



# **TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA**

## **MODELACION DE UNA RED DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE EXISTENTE PARA OPTIMIZAR EL CONSUMO DE ENERGIA**

**MANUEL CID GAMEZ**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**2015**

## Contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
1.1. TIPOS DE SUMINISTRO DE AGUA A LA POBLACIÓN.....	7
1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PROBLEMÁTICA.....	8
1.3. PLANTEAMIENTO ESPECÍFICO DEL PROBLEMA.....	11
1.4. OBJETIVOS.....	13
1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....	13
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	13
1.5. SINTESIS DEL DOCUMENTO.....	13
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>15</b>
2.1. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	15
2.1.1. <i>Control de presión de la red</i> .....	16
2.1.2. <i>Agua no contabilizada</i> .....	18
2.1.3. <i>Relación entre presión de la red y cantidad de agua no contabilizada</i> .....	19
2.2. ESTRATEGIAS DE AHORRO DE ENERGÍA EN ESTACIONES DE BOMBEO.....	20
2.2.1. <i>Estrategias para ahorro de energía en la estación de bombeo</i> .....	21
2.2.2. <i>Modelos existentes para reducir energía en las redes de distribución</i> .....	24
<b>3. DISEÑO DE MODELO DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO BASADO EN DATOS DE VARIABLES DE OPERACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>25</b>
3.1. ESTRATEGIAS TRADICIONALES PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE BOMBEO.....	26
3.2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	27
3.3. BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	28
3.3.1. <i>Curva característica de una bomba centrifuga</i> .....	30
3.4. ANÁLISIS DE DATOS Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN PARA PRINCIPALES VARIABLES HIDRÁULICAS DE LA RED.....	31
3.4.1. <i>Esquema de operación de un sistema de bombeo a una red de distribución</i> .....	32
3.4.2. <i>Determinación de las variables hidráulicas del sistema</i> .....	32
3.4.3. <i>Determinación de las zonas de operación de la red de distribución</i> .....	33
3.4.4. <i>Análisis de bloques para determinar las zonas de operación por día y entre días de la semana</i> .....	41

3.4.5.	<i>Modelo de regresión de variables de operación.....</i>	<i>43</i>
3.4.6.	<i>Potencia hidráulica en función de la presión mínima permitida de consigna de un punto crítico de la red de distribución para sistema de bombeo zona 1 de acueducto de Barranquilla.....</i>	<i>44</i>
3.4.7.	<i>Regresión de la presión de estación de bombeo en función de la presión crítica de la red.</i>	<i>45</i>
3.4.8.	<i>Regresión del caudal <b>QZ1</b> de salida de la estación de bombeo en función de la presión crítica de la red <b>PCC</b>.....</i>	<i>47</i>
3.5.	ESTADOS TRANSITORIOS. ....	51
<b>4.</b>	<b>VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO PARA REDUCIR ENERGÍA EN ESTACIONES DE BOMBEO. ....</b>	<b>56</b>
4.1.	VALIDACIÓN DEL MODELO. ....	56
4.1.1.	<i>Validación del modelo de regresión diurno. ....</i>	<i>56</i>
4.1.2.	<i>Validación del modelo de regresión nocturno. ....</i>	<i>57</i>
4.2.	IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA REDUCIR ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO. ....	59
4.2.1.	<i>Matriz del sistema.....</i>	<i>60</i>
4.2.2.	<i>Presiones de consigna.....</i>	<i>60</i>
4.2.3.	<i>Eficiencia del sistema. ....</i>	<i>61</i>
4.2.4.	<i>Variación de volumen.....</i>	<i>62</i>
4.2.5.	<i>Mejor combinación de bombas y ahorros de energía.....</i>	<i>62</i>
4.2.6.	<i>Caso real de aplicación del modelo para reducir la energía en un sistema de bombeo existente.....</i>	<i>65</i>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES . ....</b>	<b>70</b>

## ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Pérdidas de Agua en los Sistemas de Acueducto de Colombia. Valores en porcentaje[7].</i>	9
<i>Ilustración 2. Sistema de redes de distribución de agua potable de la zona norte del Departamento del Atlántico - Colombia[9].</i>	15
<i>Ilustración 3. PID de control de presión en el PIR de la red de distribución de agua potable. Triple A S.A.[9]</i>	16
<i>Ilustración 5. Perfil de presiones de acuerdo a la hora del día.[12]</i>	17
<i>Ilustración 6. Factor de Pérdida para Diferentes Niveles de Presión.[11]</i>	20
<i>Ilustración 7. Clasificación de las máquinas que se distribuyen el consumo global de energía. Las bombas tienen el 22% lo cual significa un gran potencial de ahorro[14].</i>	21
<i>Ilustración 8. Tipica de Carta de Ciclo de Vida de una Bomba. Del preciso dimensionamiento depende un ciclo de vida eficiente[14].</i>	23
<i>Ilustración 9. Estrategia de ahorro de energía colocando equipos de bombeo ajustados a la demanda de potencia. [14]</i>	23
<i>Ilustración 10. Esquema de flujo de energía en proceso de bombeo.</i>	26
<i>Ilustración 12. Comportamiento de variables Presión y Caudal de la red con respecto a la hora del día. Fuente: Scada AAA.</i>	27
<i>Ilustración 11. Redes de la zona de presión 1 de la Ciudad de Barranquilla..</i>	27
<i>Ilustración 13. Perfil de Presión de Red Zona 1 en PIR y Presiones de Consigna.[9]</i>	28
<i>Ilustración 14. Visualización de una estación de bombeo desde el SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). [9]</i>	29
<i>Ilustración 15. Curva característica de una bomba centrífuga con información geometrica, datos de potencia, eficiencia y NPSH.[9]</i>	31
<i>Ilustración 16. Esquema de un sistema de bombeo hacia una red de distribución. El agua es bombeada desde el tanque de almacenamiento hacia la red de distribución por medio de una o más bombas en paralelo. El centro de control de operaciones monitorea la red de distribución por medio los “PIR”(Puntos de Inspección Remota) constituidos por sensores de presión ubicados en sectores críticos de la red. Los “PIR” tienen asignados unos límites máximos y mínimos.[9]</i>	32
<i>Ilustración 17. Gráfico de probabilidad normal de residuales para verificar el supuesto de normalidad del experimento día 1 (Lunes)</i>	38
<i>Ilustración 18. Residuales con respecto al tratamiento (hora del día). En los óvalos resaltados se pueden apreciar las zonas de transición del sistema de bombeo.</i>	39
<i>Ilustración 19. Residuales vs Tratamientos para el datos filtrados día 1 (Lunes)</i>	40
<i>Ilustración 20. Verificación del supuesto de normalidad de los residuales para los datos filtrados del día 1 (Lunes)</i>	40
<i>Ilustración 21. Relación entre la presión de salida de la estación (Palta) y la presión en el punto crítico de la red (PCC) cumplen una función lineal que varía dependiendo del horario o zona de operación.</i>	45

<i>Ilustración 22. Diferentes errores del modelo de regresión de QZ1 en función de PCC para diferentes datos de presión hidrostática.</i>	50
<i>Ilustración 23. Clasificación de las dos zonas de operación identificadas del sistema para un día de la semana. Las zonas color gris entrega datos no válidos para el análisis producto de las perturbaciones ocasionadas durante el ajuste de la maquinaria al sistema.</i>	51
<i>Ilustración 24. Gráfico de comportamiento de variables de operación durante una rotación de equipos de bombeo. Este tipo de datos fueron filtrados para mejorar el modelo de regresión.</i>	52
<i>Ilustración 25. Estados transitorios detectados en la investigación. Tiempos de respuesta de variables de operación ante una manipulación de válvulas en el sistema de bombeo. La respuesta de Palta (ubicada en la estación) es la más rápida con respecto a PCC y QZ1.</i>	53
<i>Ilustración 26. Respuesta de cada una de las variables ante incremento en el bombeo. La primera en reaccionar es la señal Palta mientras que QZ1 es la menor por fenómenos hidráulicos.</i>	53
<i>Ilustración 27. Respuesta de las señales de las variables QZ1, Palta y PCC debido a disminución de la demanda de la red de distribución entre <math>t=5</math> y <math>t=15</math>.</i>	54
<i>Ilustración 28. Respuesta de las variables de operación ante un incremento de la demanda en <math>t=2</math>. Las presiones disminuyen mientras el flujo incrementa hasta que en el instante <math>t=4</math> la estación incrementa el caudal, posteriormente las presiones siguen a la baja.</i>	54
<i>Ilustración 29. Gráfico de residuales vs Potencia Hidráulica ajustada para zona de operación diurna.</i>	57
<i>Ilustración 30. Gráfico de probabilidad normal de residuales para validación modelo de regresión Diurno.</i>	57
<i>Ilustración 31. Gráfico de residuales vs Potencia Hidráulica ajustada Nocturna.</i>	58
<i>Ilustración 32. Gráfico del supuesto de normalidad de los residuales para validación de modelo zona de operación nocturna.</i>	58
<i>Ilustración 33. Cuadro de ingreso de las presiones de consigna al aplicativo de Matlab con el número de horas programadas.</i>	61
<i>Ilustración 34. Aplicativo para simular consumo de energía en sistemas de bombeo contra red de distribución. Curvas de bombas, sistema, indicadores de ahorro energía y volumen, eficiencia.</i>	64
<i>Ilustración 35. Registro de presiones registradas en la red de distribución Zona 1 en un día típico vs Presiones de consigna establecidas.</i>	65
<i>Ilustración 36. Visualización del aplicativo computacional para diagnóstico y proyección de ahorros hidráulicos y energéticos en sistemas de bombeo.</i>	67

## TABLAS

Tabla 1. Resumen de los componentes del balance hídrico de la Red de Distribución de Agua Potable.....	18
Tabla 2. Valores de factores de Flujo de Agua Para Diferentes Empresas de Servicio.....	19
Tabla 3. Día 1 (Lunes) valores $y_i$ para cada una de las variables de operación de la red de distribución.....	34
Tabla 4. Tabla de datos tomados de caudal QZ1 para clasificación zonas de operación con respecto a la demanda de la red. ....	36
Tabla 5. Tabla Anova Día 1 (Lunes) para determinar si existen variaciones de caudal con respecto a la hora del día. ....	37
Tabla 6. Resumen de tablas ANOVA de experimento para determinar si existe variación de caudal con respecto a la hora del día.....	37
Tabla 7. Datos de flujo para el día 1 (lunes) filtrando los datos de las zonas de transición identificados....	39
Tabla 8. Resumen de tablas ANOVA para determinar variación de caudal durante el día para cada día de la semana. ....	41
Tabla 9. Datos $y_i$ organizados para análisis de bloques para determinar si existe variación en un mismo día y entre varios días de la semana. ....	42
Tabla 10. Tabla Anova con análisis de bloques para determinar variación entre las horas del día y entre los días de la semana con respecto al Domingo.....	42
Tabla 11. Análisis de regresión para determinación de la presión de salida de la estación de bombeo (Palta) en función de la presión del PIR (PCC) durante las horas del día. ....	46
Tabla 12. Análisis de regresión para determinación de la presión de salida de la estación de bombeo (Palta) en función de la presión del PIR (PCC) durante las horas de la noche.....	46
Tabla 13. Resultado del análisis de datos <u>diurnos</u> para determinar modelo de regresión de QZ1 en función de la presión de la red de distribución en el PIR PCC.....	48
Tabla 14. Resultado del análisis de datos <u>nocturnos</u> para determinar modelo de regresión de QZ1 en función de la presión de la red de distribución en el PIR PCC. ....	49
Tabla 15. Datos de entrada aplicativo de optimización de bombeo Zona 1 barranquilla. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 16. Datos de salida aplicativo Matlab para caso real de optimización Zona 1 Barranquilla..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 17. Resultados de aplicativo caso real Zona 1 Barranquilla..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	

## **1. Introducción.**

Los sistemas de bombeo y transporte de agua para consumo humano consumen una cantidad significativa de energía[1]. El servicio de energía constituye el mayor costo de operación en la mayoría de los acueductos del mundo y pueden constituir hasta el 65% del presupuesto de funcionamiento de las empresas de agua[2]. Con respecto al total de la energía que se consume un país como Estados Unidos cerca del 3% se utiliza para la operación de los sistemas de abastecimiento de agua potable y manejo de las aguas residuales. [3]

Mejorar la eficiencia en el uso del agua es una oportunidad importante para reducir la demanda de energía y contribuir con el medio ambiente[1], [4]. Entre más eficiente sea el consumo de energía de las estaciones de bombeo mejor sostenibilidad financiera tendrán las empresas y municipios y por lo tanto mejor calidad del servicio hacia la población.

### **1.1. Tipos de suministro de agua a la población.**

Desde el punto de vista energético existen dos métodos de suministrar agua potable a una población:

- Por gravedad, en el que se aprovecha los niveles topográficos para transportar el agua. Es el caso de ciudades ubicadas en zonas montañosas donde se aprovechan los altos niveles de las fuentes hídricas para tratar y suministrar agua potable a la población.
- Por bombeo, en el que es necesario impulsar o elevar el agua por medio de sistemas de bombas. En estos casos las fuentes hídricas se encuentran a niveles iguales o inferiores con respecto al de la comunidad.

El transporte de agua potable por una tubería desde una estación de bombeo hasta un tanque de almacenamiento es posible estudiarlo a través de las ecuaciones y software de mecánica de fluidos, lo cual permite diseñar, seleccionar y optimizar los equipos de bombeo apropiadamente. Sin embargo, para el caso de bombeo directo se incrementa el grado de dificultad y las simulaciones computacionales no son precisas. Esto se debe a que las redes de distribución se caracterizan por tener patrones de consumo que dependen de:

- Hora de día.
- Día de la semana.
- Época del año.
- Condiciones meteorológicas.

A estos patrones de consumo se suman condiciones operacionales que hacen más impredecible el comportamiento del sistema a través de simulaciones computacionales:

- Conexiones no autorizadas o fraudulentas.
- Planos equivocados o desactualizados.
- Vejes de la red.

## **1.2. Descripción general de la problemática.**

Los sistemas de acueducto que necesitan del bombeo para funcionar presentan el consumo de energía eléctrica como el principal costo de operación incluso por encima del costo de los químicos. En el caso de Estados Unidos, los costos de energía para el abastecimiento de agua a la población representa entre el 3 del total de energía que consume el país.[5]

En los sistemas de bombeo hacia la red de distribución no existe una única curva que modele el comportamiento del sistema, sino que existen un grupo indeterminado de curvas de operación por los patrones de consumo y las condiciones operacionales. Para estos casos regularmente se miden las variables de presión y caudal y se determina la bomba o el grupo de bombas suficiente para



abastecer la demanda del sistema. Existen softwares de simulación que permiten tener aproximaciones del comportamiento del sistema, sin embargo los resultados no logran igualar los valores reales de los sistemas. Esto obedece a que las redes no son visibles por estar bajo tierra y no se logra tener información precisa de sus dimensiones, materiales y el estado en que se encuentra. Para el caso de Barranquilla, el 25% de sus redes de distribución datan de la década de los años 30. Adicionalmente los acueductos, especialmente en los países en vía de desarrollo, presentan pérdidas de caudal debido a fugas no visibles y conexiones fraudulentas. Según datos suministrados por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) el 43% del agua bombeada en Colombia se pierde en las redes de distribución. La ciudad con más índice de pérdidas es Barranquilla con el 53%, esto coincide con que tiene el acueducto más antiguo del país. En Norteamérica algunos acueductos alcanzan a registrar pérdidas del 32% y de acuerdo a investigaciones de la AWWA (American Water Works Association) la mayoría de las pérdidas debido a fugas ocurren en las acometidas domiciliarias y en menor medida en las tuberías principales.[6]



Ilustración 1. Pérdidas de Agua en los Sistemas de Acueducto de Colombia. Valores en porcentaje[7].

El ministerio del medio ambiente de Colombia permite de las empresas de acueducto recuperen los costos operacionales a través de las tarifas que pagan los usuarios, sin embargo establece unas restricciones para no permitir que los clientes paguen por sistemas de acueductos ineficientes. Con respecto a los costos de energía, el ministerio sólo reconoce costos operacionales que cumplan los siguientes requisitos:

- Eficiencias de bombeo iguales o superiores al 60%[8].
- Pérdidas de agua iguales o inferiores al 35%[8].

Bajo estas condiciones, la empresa de servicios de acueducto de la ciudad de Barranquilla no recupera la totalidad de sus costos operacionales debido a que la eficiencia del sistema de bombeo se encuentra en el 54% y el índice de pérdida se encuentra cercano al 50%.

Cerca del 60% de la Energía utilizada en el bombeo se consume en el transporte de agua entre los tanques que se encuentran distribuidos en diferentes puntos de la ciudad con una eficiencia cercana al 70% y las pérdidas en la conducción tienen valores cercanos al 20%. Estos valores satisfacen las restricciones que establece el ente regulador.

Por otra parte, el restante 40% de la Energía de bombeo se consume en suministrar agua a las redes de distribución que registran pérdidas cercanas al 60%. Constantemente la empresas invierten importantes recursos para la disminución de las pérdidas volumétricas sin embargo los resultados logrados no son significativos pudiéndose interpretar que los esfuerzos han sido para evitar que la situación empeore.

Las redes de distribución actualmente son administradas por ingenieros civiles y su plan de acción para disminuir las pérdidas consiste en:

- Dividir las redes de distribución en circuitos más pequeños donde se controlan indicadores de pérdidas individuales.
- Remplazo periódico de medidores volumétricos domiciliarios.

- Plan de remplazo de tuberías en mal estado.
- Monitoreo por ultrasonido para detección de fraudes y fugas no visibles.

Paralelamente los ingenieros mecánicos y electricistas administran las estaciones de bombeo y sus acciones se enfocan en el incremento de la eficiencia del sistema. Las actividades comúnmente utilizadas son:

- Monitoreo de la eficiencia de la estación.
- Plan de mantenimiento de unidades de bombeo.
- Ajustes hidráulicos de las bombas a los requerimientos del sistema.

Las regulaciones a las tarifas tienen vigencia hasta el año 2014 y las previsiones indican que el próximo marco regulatorio será más exigente que el actual, lo cual amenaza la sostenibilidad financiera de muchos acueductos en el país. Para compensar esto, el gobierno a través del marco regulatorio de tarifas reconoce las inversiones que mejoren las eficiencias de los acueductos. Cada cuatro años las empresas tienen oportunidad de presentar proyectos de mejoras en la infraestructura los cuales deben ser aprobados por la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD). Una vez aprobados los proyectos deben ejecutarse de manera obligatoria y los resultados son evaluados posteriormente.

### **1.3. Planteamiento específico del problema.**

Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas, se plantea la pregunta ¿Cómo hacer proyectos en acueductos de la región que mejoren la eficiencia de bombeo y simultáneamente bajen los índices de pérdida de agua usando redes de distribución existentes?

La percepción que se tiene de la forma de resolver el problema es que los administradores de las redes de tuberías y los ingenieros de las estaciones de

bombeo no han trabajado en conjunto para disminuir las pérdidas y los consumos de energía.

Los administradores de redes de tuberías controlan el sistema a través de la presión de la red medida en la salida de la estación de bombeo. La presión de la red debe ser lo suficiente para que el agua sea suministrada a los usuarios en todos los puntos de la misma. El operador de la red establece una presión de consigna y para cumplirla realiza una programación de bombas y válvulas de diferentes capacidades de acuerdo a los patrones de consumo de la zona o municipio atendido.

Para realizar una investigación que entregue un modelo de ahorro de energía es necesario estudiar el comportamiento de las redes de distribución y posteriormente hacer el proceso de optimización de los sistemas de bombeo.

Por su parte, las estaciones de bombeo están conformadas por los equipos principales con sus respectivos back up o suplentes. Generalmente las estaciones de bombeo se diseñan con equipos de capacidades diferentes para satisfacer los cambios de demanda de la red de distribución. Las bombas son accionadas por motores eléctricos los cuales tienen una fiabilidad muy alta comparado con los motores de combustión interna además de otras ventajas como la baja emisión de ruido y partículas contaminantes en sectores urbanos. Sin embargo estos motores tienen la desventaja de funcionar a una sola velocidad la cual es configurada a través del número de polos de la bobina del motor en el momento de su fabricación. La mayoría de los sistemas de acueducto están equipados con motores eléctricos y sólo algunas estaciones de bombeo usan los motores de combustión interna para generar electricidad cuando ocurren fallas en el servicio de energía. El problema de la velocidad única de operación no permite que las bombas ajusten el caudal a las necesidades del sistema, para ello los operadores tienen tres opciones:

- ✓ Alternar bombas de diferentes capacidades.
- ✓ Estrangular las válvulas.
- ✓ Retornar el agua hacia los tanques de almacenamiento.

Todas estas opciones constituyen sobre costos de energía para el proceso.

En las dos últimas décadas se ha desarrollado aceleradamente la tecnología de los variadores de velocidad para los motores eléctricos. Estos equipos rectifican la corriente alterna y luego construyen nuevamente una onda sinusoidal pero a una frecuencia y/o voltaje diferente que es suministrada al motor eléctrico para que funcione a la velocidad deseada. De esta manera la bomba ajusta su velocidad de acuerdo a la demanda de la red manteniendo la consigna de presión constante y disminuyendo el consumo de energía.

#### **1.4. Objetivos.**

##### **1.4.1. Objetivo general.**

Diseñar un modelo que permita la identificación del comportamiento de una red de distribución de agua potable y una metodología para optimizar el consumo de energía de una estación de bombeo.

##### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- Identificar los factores relevantes que se presentan en el proceso de bombeo a una red de distribución de agua potable.
- Optimizar el consumo de energía a partir del análisis de las zonas de operación identificadas durante la investigación. Verificar si existe relación entre el consumo de energía y las pérdidas de agua de la red.
- Diseñar modelo que permita optimizar un sistema de bombeo existente mediante el control de presiones en la red de distribución.

#### **1.5. Síntesis del documento.**

Se ha presentado en este capítulo introductorio aspectos generales relacionados

con los sistemas de bombeo a redes de distribución de agua potable. En particular, se ha destacado la pertinencia de métodos para la disminución de consumo de energía y de disminución de agua no contabilizada. Se presta especial atención a los inconvenientes presentados por los altos índices de agua no contabilizada. En miras de abordar estas problemáticas, se presenta en el capítulo 2 una visión general de las técnicas de ahorro de energía en estaciones de bombeo y el efecto en la disminución de agua no contabilizada basada en datos aplicados en la literatura.

Adicionalmente el proceso de diseño de la estrategia de disminución de consumo de energía basado en control de presiones se expone en el capítulo 3. Posteriormente en el capítulo 4 el método expuesto es evaluado en un procedimiento de validación y análisis de desempeño, para presentar finalmente en el capítulo 5 las conclusiones de esta investigación y los trabajos futuros posibles a desarrollar.

## 2. Estado del arte

El estudio de un modelo para el ahorro de energía eléctrica en las estaciones de bombeo de redes de agua potable utilizará la información académica para la búsqueda de soluciones de problemas reales de la sociedad. La disminución del consumo de energía de un acueducto a partir de la optimización de las presiones y caudales de una red de distribución de una población beneficiaría económicamente a la industria del agua y a la población atendida al racionar su consumo de agua potable con presiones controladas de una forma responsable con el medio ambiente.

### 2.1. Redes de distribución de agua potable.

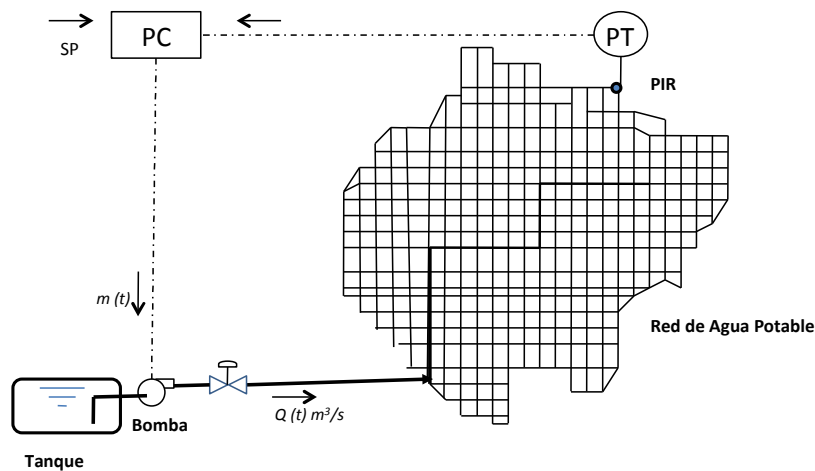
Las redes de distribución de agua potable son un conjunto interconectado de tuberías subterráneas de diferentes diámetros que distribuyen volúmenes de agua potable a una ciudad o población con una presión determinada. La red de distribución recibe el agua presurizada de una estación de bombeo que a su vez está compuesta por equipos electromecánicos que toman el agua de un tanque de almacenamiento y lo impulsan a presión y caudal determinado. Las redes también están compuestas por válvulas de cierre de circuitos, válvulas de control de presión, válvulas de control de flujo, hidrantes, indicadores de presión e indicadores de flujo.



Ilustración 2. Sistema de redes de distribución de agua potable de la zona norte del Departamento del Atlántico - Colombia[9].

### 2.1.1. Control de presión de la red.

El control de la presión en la red está relacionado directamente con la calidad del servicio que se le entrega a los clientes[10]. Este valor de presión debe ser suficiente para que el flujo de agua sea el requerido por el cliente en cualquier punto de la edificación, el volumen de agua utilizado se registra en un medidor certificado que soportará el proceso de facturación y cobro mensual del servicio suministrado.



**Ilustración 3. PID de control de presión en el PIR de la red de distribución de agua potable. Triple A S.A.[9]**

Existen metodologías [11] para determinar la presión óptima de entrada en diferentes puntos de la red de distribución permitiendo un manejo planificado basado en la economía de la operación por medio de:

- Reducción de pérdidas comerciales de agua
- Disminución de roturas de tuberías.
- Incremento de la vida útil de la red.
- Identificación de zonas con problemas comerciales.
- Localización de usuarios con problemas en el servicio.
- Localización de zonas con altas tasas de pérdidas por fugas y fraudes.
- Creación de planes y proyectos de inversión acordes a las necesidades.
- Gestión de costos operacionales del sistema de distribución de agua.[11]



El control de las presiones puede hacerse desde la estación de bombeo o en las tuberías principales dentro de la red de distribución. Las válvulas reductoras de presión (PRV, pressure reduction valves) instaladas en puntos estratégicos permiten disminuir las presiones hasta los valores óptimos que permitan el equilibrio para el beneficio mutuo entre la empresa de servicio y el cliente. [12]

En la Ilustración 5 se puede observar la variación de la presión con respecto a la hora del día antes y después de un programa de reducción de presiones usando las PRV. De esa forma se mantienen presiones más uniformes maximizan el nivel de servicio de la red de distribución de agua para prevenir posibles fallas en el sistema. Existen modelos determinísticos desarrollados para mejorar la red de distribución buscando las presiones óptimas para que la tubería no esté sometida a elevados índices de resiliencia [7].

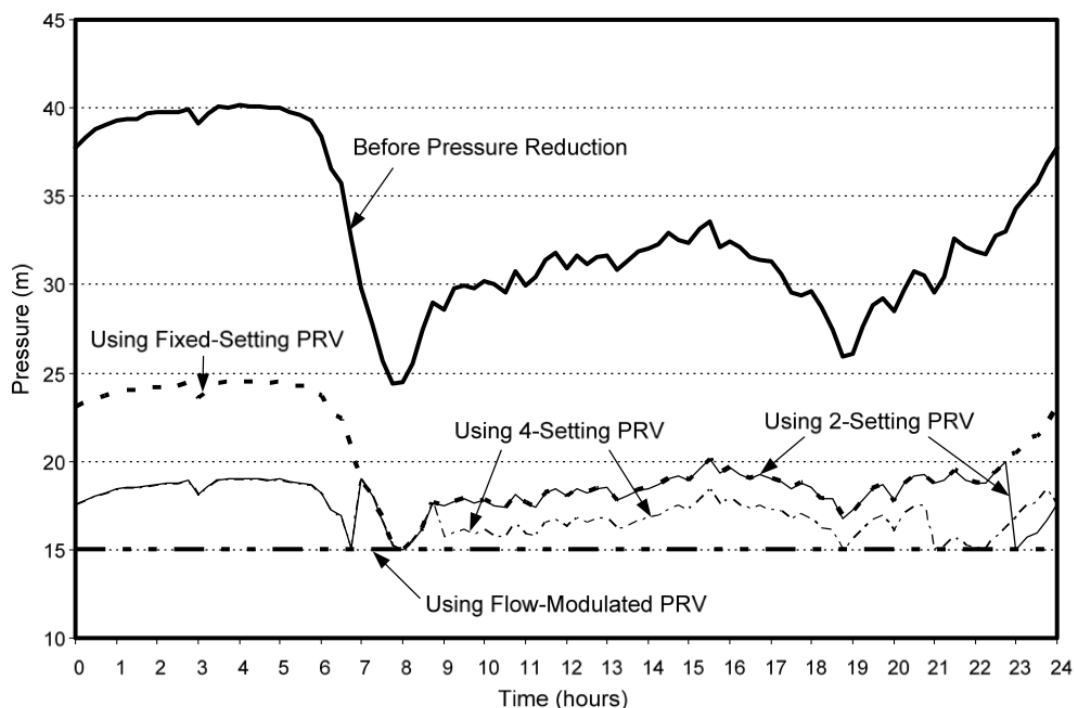


Ilustración 4. Perfil de presiones de acuerdo a la hora del día.[12]

### 2.1.2. Agua no contabilizada.

Aunque existen muchas razones para minimizar fugas en redes de distribución de agua potable tal vez la más importante está relacionada con la calidad del servicio que se afecta por la intrusión de patógenos y los ahorros en inversiones para expandir infraestructura. Se han realizado estudios para determinar el destino final de las denominadas agua no controlada o contabilizada[13]. En la Tabla 1 se puede observar la clasificación del flujo de la red de distribución de acuerdo al destino final. El flujo  $Q$  estaría dividido en dos componentes principales: Flujo registrado por todos los medidores volumétricos de los clientes  $Q_m$  y el flujo no controlado  $Q_u$ . Este último está dividido en flujo consumido por el cliente pero no medido  $Q_{uc}$  y el flujo que se pierde en las tuberías de la empresa de servicio  $Q_{ul}$ [13].

**Tabla 1. Resumen de los componentes del balance hídrico de la Red de Distribución de Agua Potable[13]**

Flujo de Agua de Entrada a Sistema	Flujo de Agua Medido	Medidores volumétricos de los clientes	Consumo Doméstico
$Q$	$Q_m$		Consumo Comercial
			Consumo Industrial
			Consumo Oficial
	Flujo de Agua no Contabilizado	Flujo Consumido pero no registrado en medidores.	No registrado en medidores volumétricos del cliente (errores)
	$Q_u$	$Q_{uc}$	$Q_{uce}$
			Clientes con cuota fija o sin medición
			Hidrantes
			Conexiones ilegales o fraudes
		Fugas en Tuberías Principales o en Conexiones de Servicio	Pérdidas Reales
		$Q_{ul}$	

En la tabla 2 se pueden comparar los diferentes factores de la clasificación de flujo para diferentes ciudades del mundo con diferentes niveles económicos.

Tabla 2. Valores de factores de Flujo de Agua Para Diferentes Empresas de Servicio.[13]

Zurich, Switzerland (Skarda 1997)	$Q_m/Q=0.907$		
	$Q_u/Q=0.093$	$Q_{uc}/Q=0.040$	$Q_{uc}/Q_u=0.430$
		$Q_{ul}/Q=0.053$	$Q_{ul}/Q_u=x=0.570$
San Sebastián, Spain (Almandoz et al. 2003)	$Q_m/Q=0.739$		
	$Q_u/Q=0.261$	$Q_{uc}/Q=0.055$	$Q_{uc}/Q_u=0.210$
		$Q_{ul}/Q=0.206$	$Q_{ul}/Q_u=x=0.790$
Water Industry, England and Wales (Ofwat 2001)	$Q_m/Q=0.325$		
	$Q_u/Q=0.675$	$Q_{uc}/Q=0.517$	$Q_{uc}/Q_u=0.766$
		$Q_{ul}/Q=0.158$	$Q_{ul}/Q_u=x=0.234$
Chetumal, Mexico (Ochoa and Bourguett 1998)	$Q_m/Q=0.324$		
	$Q_u/Q=0.676$	$Q_{uc}/Q=0.112$	$Q_{uc}/Q_u=0.166$
		$Q_{ul}/Q=0.564$	$Q_{ul}/Q_u=x=0.834$

### 2.1.3. Relación entre presión de la red y cantidad de agua no contabilizada.

Se han desarrollado varias metodologías para determinar la relación entre los patrones flujo de una población con respecto a la presión de la red de distribución. Un estudio de la Universidad de los Andes profundizó en la relación Demanda/Presión de Red[11], para ello realizaron un experimento durante varios meses donde se buscó demostrar que la demanda de agua de clientes con medidores no variaba con respecto a la presión de la red de distribución. Concluyeron que al incrementar la presión los registros de los medidores de los clientes no tuvieron variación significativa, sin embargo los flujos de agua se incrementaron al mismo tiempo que los índices de agua no contabilizada. En la ilustración6 se puede observar que los registros de los medidores de los usuarios no varían con respecto a la presión de la red. Sin embargo el volumen suministrado a la red o macro medido si se incrementa debido al aumento del

agua no contabilizada en clientes con cargo fijo, conexiones ilegales y fugas en tuberías.



Ilustración 5. Factor de Pérdida para Diferentes Niveles de Presión.[11]

Existen varios autores que afirman que las fugas pueden reducirse por medio de la reducción de la presión de la red. Se estima que anualmente se pierden 32 billones de metros cúbicos de agua potable en fugas por la red de distribución. Existe una ecuación para determinar el valor de las fugas en términos de la red de distribución:

Ecuación 1. Ecuación de FAVAD.

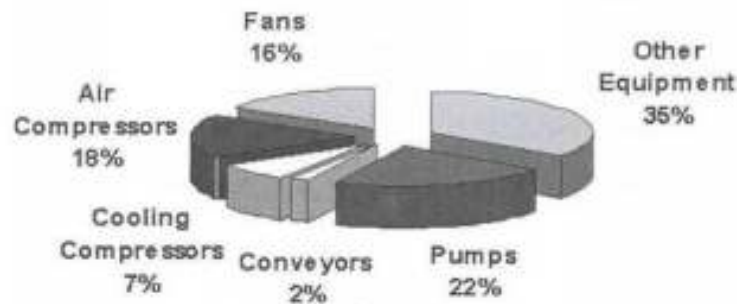
$$Q_f = Q_i \left( \frac{P_f}{P_i} \right)^n$$

Donde  $Q_f$  es la fuga final,  $Q_i$  es la fuga inicial,  $P_f$  es la presión final,  $P_i$  es la presión inicial y el exponente  $n$  es factor experimental que depende del tipo de fuga y el tipo de red de distribución.

## 2.2. Estrategias de ahorro de energía en estaciones de bombeo.

Las estaciones de bombeo suministran el flujo de agua a las redes de distribución o a los tanques de almacenamiento. Estudios del Departamento de Energía de los Estados Unidos y la Comisión Europea demostraron que el 22% de la energía global de motores eléctricos son consumidos por bombas[5]. Las estaciones de bombeo se caracterizan por ser equipos que no evidencian las ineficiencias

energéticas por lo tanto dependen de auditorías de energía para diagnosticar sus condiciones operacionales, esto hace que las estaciones de bombeo tengan un alto potencial de ahorro de energía a nivel mundial.



**Ilustración 6. Clasificación de las máquinas que se distribuyen el consumo global de energía. Las bombas tienen el 22% lo cual significa un gran potencial de ahorro[14].**

#### **2.2.1. Estrategias para ahorro de energía en la estación de bombeo.**

Existen varias estrategias propuestas para maximizar la eficiencia de las estaciones de bombeo:

- Dimensionamiento adecuado de las tuberías para disminuir la cabeza requerida para la estación de bombeo.
- Creación de perfiles de carga y zonas de operación.
- Análisis de ciclo de vida basado en eficiencia y no en costo inicial.
- Utilizar indicadores de eficiencia como kilowatts por metro cúbico ( $\text{Kw/m}^3$ ).
- Fraccionar bombas de acuerdo a la demanda o usar variadores de velocidad.
- Reemplazar viejas bombas ineficientes.
- Garantizar las condiciones iniciales para una operación ajustada al diseño de la planta.
- Desmontar válvulas que restrinjan el paso del fluido.
- Programar las bombas de acuerdo a necesidades del sistema y a los picos de tarifa de energía.

- Hacer una base de datos de registros históricos que permita tomar decisiones oportunas de la operación [14].

La fase diseño de la estación de bombeo es la más importante porque en ella se definen las condiciones iniciales de operación como presión y caudales. La potencia de la bomba está dada por la ecuación:

**Ecuación 2. Potencia Hidráulica de una bomba [14].**

$$P_H = \frac{q \rho g h}{(3.610^6)}$$

Donde,

$P_H$  , Potencia hidráulica en kWatts

$q$  , Caudal de la bomba en  $\frac{m^3}{hora}$

$\rho$  , Densidad del agua en kilogramos / metro cúbico.  $\frac{kg}{m^3}$

$g$  , Aceleración de la gravedad en metros por segundo cuadrado ( $m/s^2$ )

$h$ , Cabeza total en *metros*

El diseñador deberá dimensionar cada uno de estos factores de una forma muy precisa y poco conservadora porque de ello depende un resultado eficiente de la carta de ciclo de vida del equipo, ver ilustración8.

Para casos donde se bombea a un sistema variable como ocurre en las redes de distribución, se debe tener varios tamaños de bomba acorde con la demanda de la red. Esto produce ahorros significativos de energía comparado con la estrategia típica de apertura de retornos a tanque o regulación de válvulas de flujo [14]. Ver figura 9.

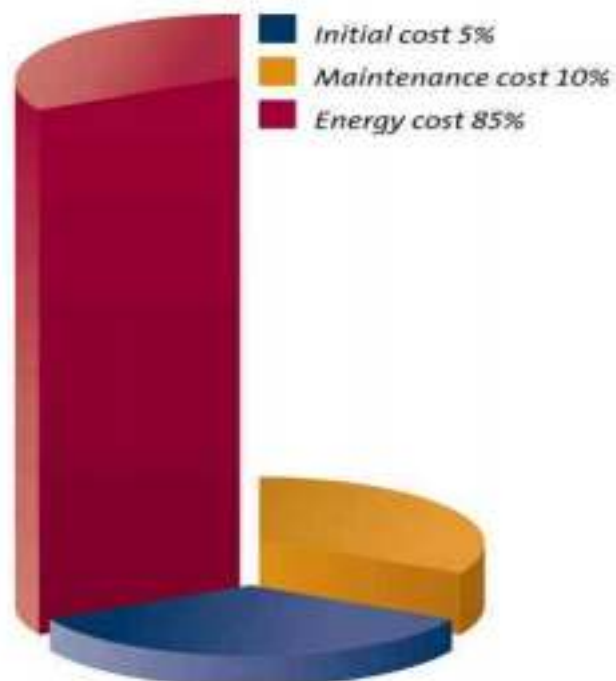


Ilustración 7. Típica de Carta de Ciclo de Vida de una Bomba. Del preciso dimensionamiento depende un ciclo de vida eficiente[14].

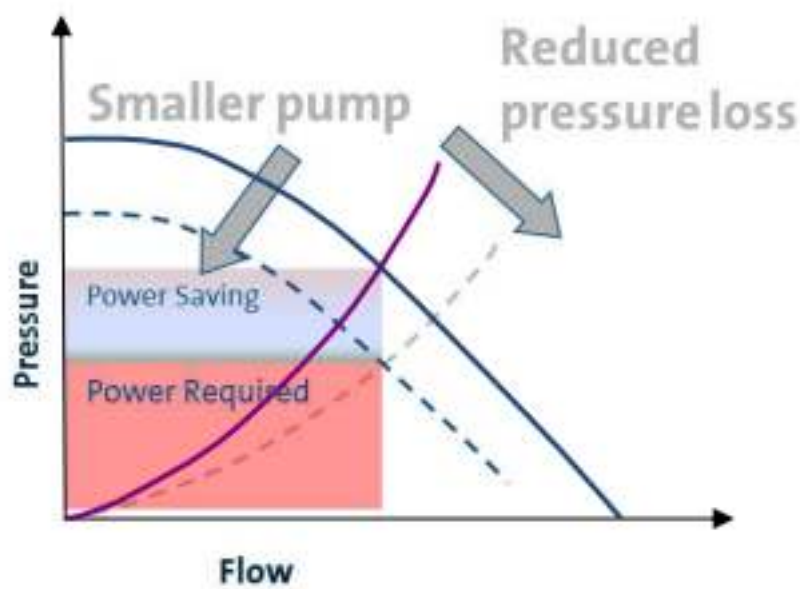


Ilustración 8. Estrategia de ahorro de energía colocando equipos de bombeo ajustados a la demanda de potencia. [14]

### **2.2.2. Modelos existentes para reducir energía en las redes de distribución.**

Existen varios modelos para simular las redes de distribución de agua potable que pueden usar desarrollos propios o herramientas informáticas especializadas. Los objetivos de dichas simulaciones buscan conocer el sistema para mejorar decisiones de calidad del servicio y mejorar la eficiencia del sistema. Los modelos están basados en las ecuaciones de continuidad de masa y energía y el principal énfasis de los modelistas es en lograr una sintonización entre los valores reales del sistema y los valores simulados del modelo. Por ello el modelista debe ingresar datos como rugosidad de tuberías, demandas del sistema, características de las bombas y otros datos de importancia que le den características particulares al sistema [15]. El éxito de los modelos se mide en que tanto se aproximen a los valores reales del sistema y para esto depende de la experiencia y la habilidad del modelista [15]. Para las redes de distribución también se han desarrollado modelos basados en nodos, cada nodo se selecciona de manera estratégica y se le instalan transductores de presión que entregan información en línea al SCADA (software de supervisión, control y adquisición de datos). La información es procesada y se logran hacer correlaciones que son muy útiles en el diagnósticos de la operación de la red [16].



### **3. Diseño de modelo de optimización energética de una estación de bombeo basado en datos de variables de operación de la red de distribución.**

Los sistemas de bombeo que suministran agua potable a las redes de distribución son consumidores de energía que operan las 24 horas todos los días del año. Los problemas de ineficiencia en las bombas no son fácilmente detectables debido a que disipan la energía desperdiciada de una forma hidráulica y no como otras máquinas que lo hacen en forma de calor, vibración y ruido. Desde el punto de vista energético existe mucho potencial de ahorro para la optimización energética de sistemas de bombeo. De igual forma los costos energéticos constituyen uno de los principales factores para la operación de las empresas de servicios públicos. El principal riesgo que tienen los diseñadores al momento de calcular equipos para una nueva planta, una ampliación de planta o un reemplazo de equipo es dimensionar con la mayor exactitud posible los parámetros de operación requeridos por sistema de tuberías o redes de distribución domiciliarias. De no ser así se corre el riesgo que el ciclo de vida de la estación sea costoso. Para eso el ingeniero debe estudiar la red de distribución y analizar todas las variables de operación como la hora del día, el día de la semana, el clima, la manipulación de válvulas y las fugas. Uno de los principales problemas es imprecisión en la modelación de las redes de distribución y su mejora depende de la experiencia y pericia del modelista. A medida que crece el tamaño y la complejidad de las redes se amplía más la diferencia entre los datos calculados y los datos reales.

Desde el punto de vista de conservación de la energía la estación de bombeo recibe energía eléctrica y la convierte en energía potencial y dinámica hidráulica en forma de Presión y Flujo. Ver esquema de la figura 10.

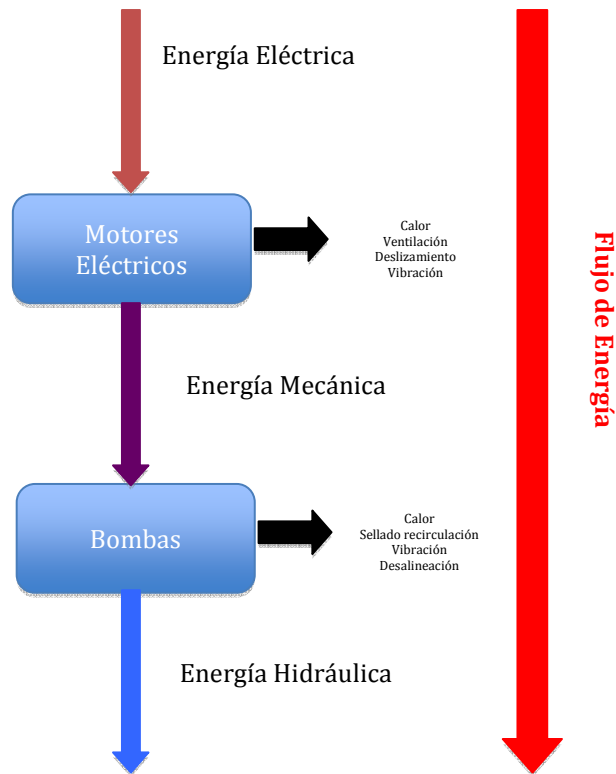


Ilustración 9. Esquema de flujo de energía en proceso de bombeo.

### 3.1. Estrategias tradicionales para la optimización energética de un sistema de bombeo.

Tradicionalmente la responsabilidad de los ahorros de energía de las estaciones de bombeo se les asigna a los ingenieros electricistas contratados o propios de las empresas de servicio. El trabajo básicamente consiste en verificar el cumplimiento que el conjunto bomba – motor estén ubicados entre un 20% por debajo a un 10% por arriba del BEP que dicta el fabricante del equipo [14]. También verifica que las condiciones mecánicas y térmicas de las máquinas cumplan con lo establecido y con respecto a la parte hidráulica ajusta los tamaños de las bombas a las necesidades del sistema con el fin de evitar o corregir cualquier regulación o estrangulamiento de válvulas.

### 3.2. Comportamiento Hidráulico de una red de distribución.

Las redes de distribución de agua potable tienen el comportamiento similar a las tuberías de llenado de tanques con la diferencia que la curva de comportamiento del sistema varía con respecto a unos patrones de consumo de la población tal como se observa en la figura 10. En horas pico el caudal es máximo y la presión tiende a ser baja mientras que en horas valle el caudal baja y la presión tiende a incrementarse [11].

La programación de los equipos de bombeo debe ser el mínimo suficiente para cubrir la demanda las 24 horas del día y de esa forma evitar sobrecostos de energía por el uso de capacidad excedentaria y estrangulamiento de válvulas.



Ilustración 11. Redes de la zona de presión 1 de la Ciudad de Barranquilla.

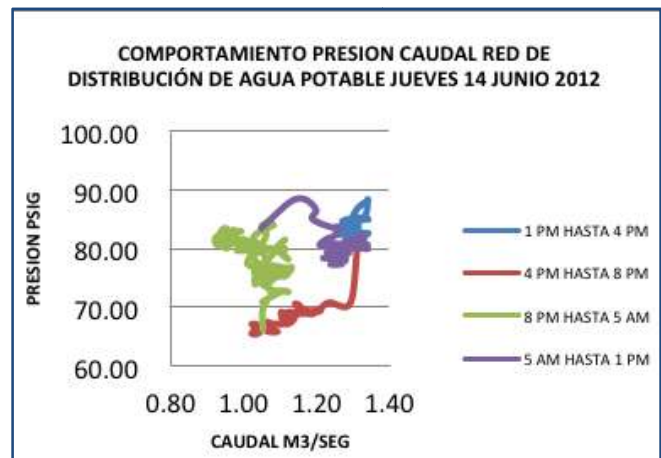
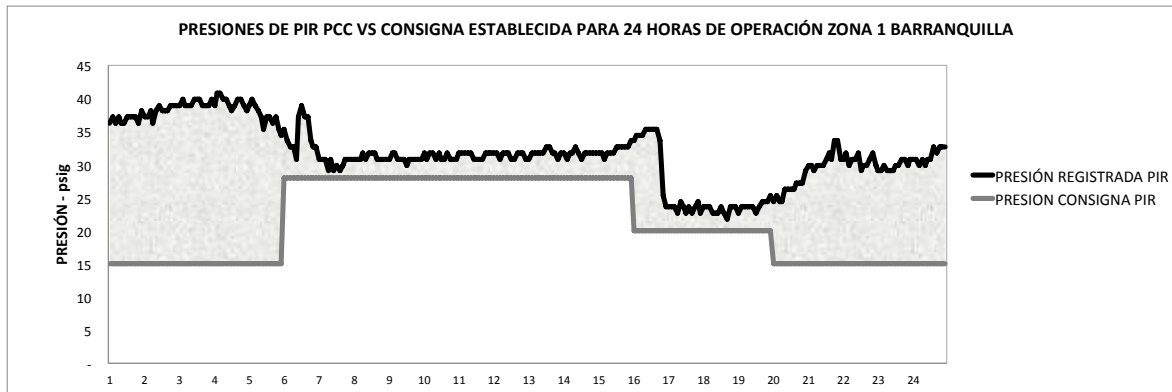


Ilustración 10. Comportamiento de variables Presión y Caudal de la red con respecto a la hora del día. Fuente: Scada AAA.

En la ilustración 10 se puede observar la red de distribución de una zona de la ciudad de Barranquilla, el agua es suministrada por una estación de bombeo (ícono WTP – Water Treatment Plant). Durante el día la curva de comportamiento del sistema varió de acuerdo a los patrones de consumo de la población (ilustración 11). Desde la 1 P.M. hasta las 4 P.M. los caudales son altos a presiones altas localizándose la operación en la esquina superior derecha. A partir

de las 4 P.M. la planta cambia la operación para prepararse para la hora de bajo consumo que empieza a partir de las 8 P.M. y la presión empieza a incrementarse con caudales relativamente bajos hasta las 5 A.M. que se empieza a incrementar el flujo para cubrir la hora pico.

Los centros de control monitorean la red de distribución por medio de sensores de presión ubicados en puntos críticos de la red denominados PIR (Puntos de Inspección Remota). Los PIR envían datos al sistema SCADA del centro de control donde se tienen creadas unas alarmas preestablecidas por los administradores de la red y cuyo criterio es garantizar la prestación del servicio a los clientes. Estos PIR se muestran en la ilustración 11 como unas antenas color rojo dispersas por las redes.



**Ilustración 12. Perfil de Presión de Red Zona 1 en PIR y Presiones de Consigna.[9]**

Las presiones de consigna de la red Zona 1 Barranquilla se maneja actualmente desde el PIR CalanCala con consignas de 28psig en la mañana, 20 psig en la tarde y 15 psig en la noche sin embargo en la ilustración 13 se puede observar los problemas actuales de falta de control de presiones.

### **3.3. Bombas Centrífugas.**

Las bombas centrífugas deben tener la capacidad de cubrir la demanda de agua potable del sistema de redes de distribución. Las bombas se agrupan en estaciones de bombeo y son programadas de acuerdo a los caudales que aportan individualmente. En la ilustración 14 se puede observar la configuración de una

estación de bombeo con cinco equipos en paralelo que son programados de acuerdo a la demanda del sistema.



**Ilustración 13. Visualización de una estación de bombeo desde el SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition). [9]**

A partir de la ecuación de la cantidad de movimiento para fluidos incompresibles se puede obtener la ecuación de Bernoulli con los términos para trabajo externo y pérdidas por fricción.

**Ecuación 3. Ecuación de Cantidad de Movimiento con Trabajo Externo y Fricción.**

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + W = h_f + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

$\gamma$ , Peso Específico del Fluido

$g$ , Aceleración de la Gravedad

$W$ , Fuente externa que extrae o consume trabajo del volumen de control.

$h_f$ , Pérdidas por fricción en el volumen de control.

$Z_1, Z_2$ , Alturas de entrada y salida del volumen de control.

$V_1, V_2$ , Velocidad de entrada y salida del volumen de control.

### 3.3.1. Curva característica de una bomba centrífuga.

Las bombas centrífugas son turbo máquinas que se basan en la ecuación de Euler,

#### Ecuación 4. Ecuación de Euler

$$\dot{W} = \dot{m}(c_{1u}u_1 - c_{2u}u_2)$$

Donde,

$\dot{W}$ , es el trabajo consumido o producido por la turbomáquina.

$\dot{m}$ , es el flujo másico que atraviesa la máquina.

$c$ , velocidad absoluta del fluido, el subíndice  $u$  indica que es tangencial, 1 y 2 es entrada y salida del volumen de control respectivamente.

$u$ , es la velocidad del rodete.

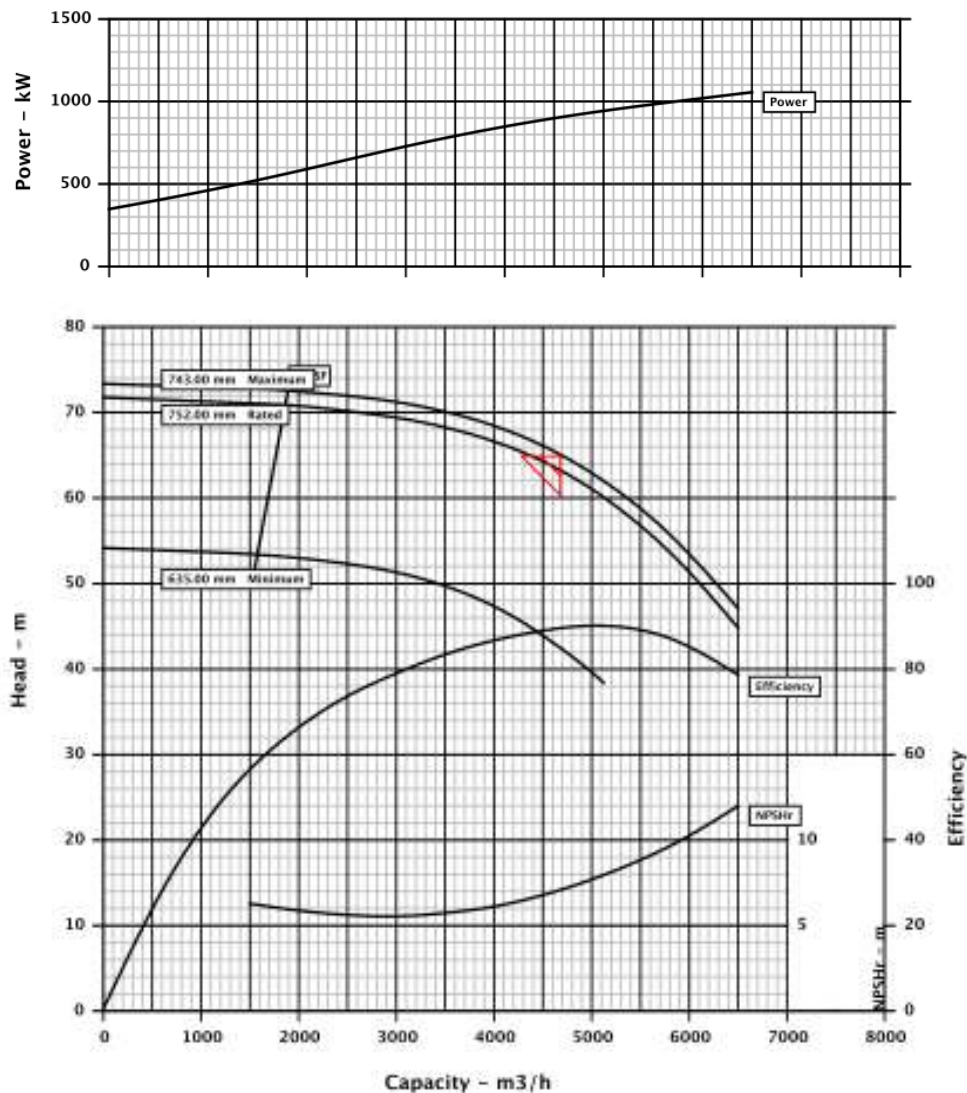
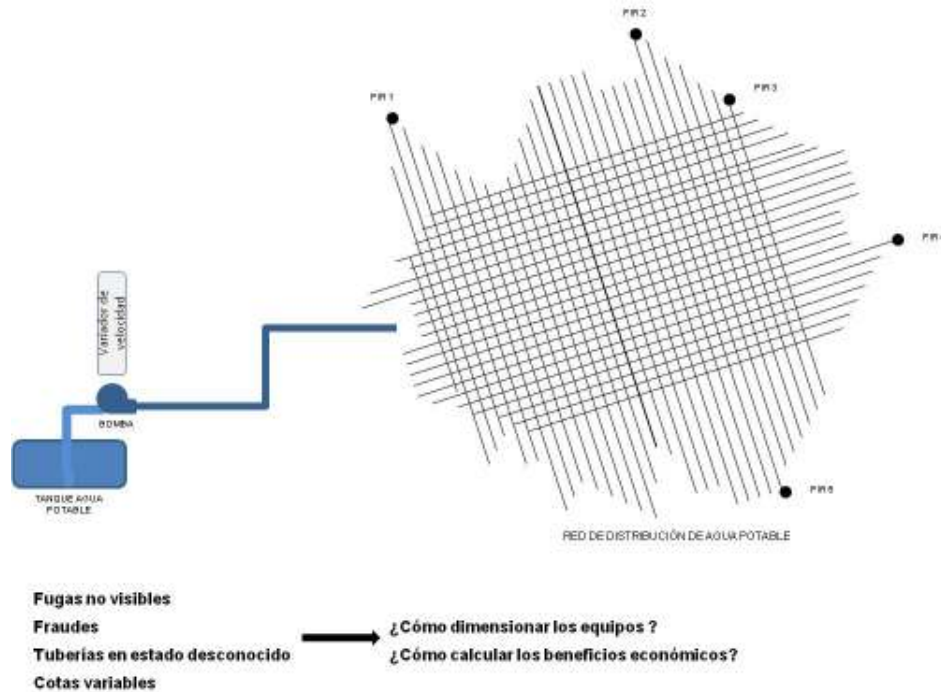


Ilustración 14. Curva característica de una bomba centrífuga con información geométrica, datos de potencia, eficiencia y NPSH.[9]

### 3.4. Análisis de datos y validación de modelos de regresión para principales variables hidráulicas de la red.

Las variables por medio de las cuales se supervisa la operación del sistema de acueducto reportan datos al sistema SCADA del centro de control. Estos datos almacenados pueden extraerse para realizar análisis del comportamiento de los sistemas de bombeo.

### 3.4.1. Esquema de operación de un sistema de bombeo a una red de distribución.



**Ilustración 15.** Esquema de un sistema de bombeo hacia una red de distribución. El agua es bombeada desde el tanque de almacenamiento hacia la red de distribución por medio de una o más bombas en paralelo. El centro de control de operaciones monitorea la red de distribución por medio los “PIR” (Puntos de Inspección Remota) constituidos por sensores de presión ubicados en sectores críticos de la red. Los “PIR” tienen asignados unos límites máximos y mínimos.[9]

El reto principal de la operación es suministrar agua cumpliendo con las consignas de presión mínima con los clientes controlando las sobre presiones que ocasionan rotura de tuberías, sobrecostos de energía e incremento de agua no contabilizada.

### 3.4.2. Determinación de las variables hidráulicas del sistema.

Desde el punto de vista energético la potencia de una bomba centrífuga está dada por la ecuación 5:

**Ecuación 5.** Potencia hidráulica de turbo máquinas.

$$P_H = \gamma q h$$

$P_H$  , Potencia hidráulica en kWatts

$q$  , Caudal de la bomba en  $\frac{m^3}{segundo}$



$\gamma$  , Peso específico del agua en.  $9800 \frac{N}{m^3}$

$h$ , Cabeza total en *metros*

De acuerdo a la ecuación las variables hidráulicas que debemos tener en cuenta para llevar los datos a términos de energía serían:

- Caudal salida estación de bombeo ( $Q_{Z1}$ )
- Presión estación de bombeo ( $P_{ALTA}$ )
- Energía hidráulica. Resultado de la ecuación 5.

En la red de distribución la variable crítica a controlar es la presión del nodo remoto o PIR que envía datos al SCADA cada 5 minutos:

- Punid, presión del Por Universal.

Para poder cumplir el objetivo general de la investigación es necesario hacer las correlaciones entre las diferentes variables identificadas. Estas correlaciones deben hacerse de la forma más precisa posible y para ello es necesario analizar y clasificar estadísticamente los patrones de comportamiento de la demanda de la población.

#### **3.4.3. Determinación de las zonas de operación de la red de distribución.**

Para la determinación de las zonas de operación se analizan los datos disponibles en el sistema SCADA. Para este análisis se toma una semana de bombeo completa con datos de operación muestreados cada 5 minutos.

El método de análisis consiste en determinar si la combinación de variables hidráulicas constituye ciclos o patrones en la demanda de la población. De existir los patrones, se determinan las zonas de operación del sistema.

Para este análisis se tomarán 12 muestras por hora de cada variable de operación lo que entregará 288 por día y totalizarán 2016 datos de cada variable durante la semana de medición. Una vez tomadas las muestras se procede a realizar el experimento

Para determinar si existen varias zonas de operación en un día normal de bombeo en la Zona 1 de Barranquilla se hace necesario procesar los datos obtenidos experimentalmente para obtener las conclusiones válidas estadísticamente. Esto dará validez o no a la hipótesis que afirma que los hábitos de la población producen la variación de la demanda del servicio de acueducto durante 1 día normal de trabajo.

Hipótesis nula: El servicio de acueducto no varía con las horas del día.

Hipótesis alternativa: El servicio de acueducto varía con respecto a las horas del día.

En la tabla 3 se relacionan los datos de las principales variables de operación de para el primer día de la semana.

**Tabla 3. Día 1 (Lunes) valores  $y_i$  ara cada una de las variables de operación de la red de distribución. Tomado del SCADA. [9]**

Día 1 Lunes						
hora	PCC	QZ1	Palta	Pmix	Puniv	Potencia
	psig	m <sup>3</sup> /seg	psig	psig	psig	kW
1	32	0,68	86	48	40	400
2	39	0,78	93	51	46	498
3	39	0,80	93	52	46	509
4	38	0,80	92	51	45	505
5	35	0,76	90	48	43	471
6	25	0,79	80	38	33	436
7	23	0,83	79	29	29	449
8	32	1,00	91	28	38	626
9	33	1,04	91	27	38	648
10	33	1,03	91	25	39	645
11	30	1,04	88	26	34	623
12	33	1,04	91	26	37	650
13	24	0,93	82	26	30	520
14	21	0,82	77	26	27	431
15	21	0,84	75	25	27	433
16	20	0,84	75	25	27	434
17	19	0,83	74	26	26	424
18	14	0,82	68	26	22	383
19	13	0,73	65	29	21	329
20	15	0,69	69	32	24	328
21	18	0,68	72	35	27	337
22	21	0,68	76	36	29	351
23	32	0,75	86	40	38	443
24	35	0,81	89	42	41	493

La variable caudal es la más adecuada para definir si se puede o no clasificar la demanda de agua potable de una red de distribución en diferentes zonas de operación. Se realiza una tabla ANOVA para determinar la significancia o no de dicha variable.

Suposiciones:

- El servicio de acueducto se mantuvo constante durante toda la jornada.
- Los instrumentos están debidamente calibrados por ser variables críticas del proceso.
- El registro de los datos en el sistema SCADA se realizaron con retrasos de señal  $< 2$  minutos.
- Los registros tomados del sistema SCADA efectivamente pertenecen a las variables de la red de distribución en estudio.

Tabla 4. Tabla de datos tomados de caudal  $Q_{z1}$  para clasificación zonas de operación con respecto a la demanda de la red.

Nivel	Replica											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,664	0,642	0,635	0,656	0,647	0,658	0,681	0,673	0,687	0,698	0,735	0,757
2	0,752	0,756	0,753	0,730	0,769	0,787	0,777	0,781	0,814	0,817	0,812	0,815
3	0,795	0,811	0,821	0,844	0,865	0,815	0,801	0,761	0,765	0,775	0,767	0,786
4	0,788	0,799	0,785	0,768	0,778	0,787	0,766	0,789	0,798	0,851	0,861	0,833
5	0,820	0,770	0,758	0,758	0,756	0,744	0,743	0,753	0,773	0,752	0,769	0,761
6	0,760	0,770	0,755	0,772	0,771	0,772	0,772	0,804	0,802	0,839	0,843	0,837
7	0,862	0,822	0,820	0,798	0,802	0,802	0,783	0,797	0,845	0,884	0,881	0,903
8	0,950	0,976	0,955	0,946	0,977	0,987	0,999	1,010	1,022	1,048	1,042	1,044
9	1,033	1,030	1,064	1,061	1,046	1,032	1,027	1,042	1,031	1,002	1,020	1,038
10	1,042	1,042	1,025	1,040	1,047	1,048	1,048	1,044	1,054	1,016	0,995	1,005
11	1,004	1,007	1,015	1,024	1,026	1,037	1,037	1,027	1,044	1,052	1,064	1,073
12	1,065	1,044	1,033	1,040	1,040	1,038	1,021	1,021	1,029	1,036	1,047	1,045
13	1,074	1,059	1,059	1,059	0,940	0,889	0,874	0,862	0,835	0,860	0,825	0,817
14	0,819	0,819	0,832	0,819	0,827	0,824	0,808	0,801	0,833	0,809	0,832	0,828
15	0,840	0,850	0,840	0,850	0,848	0,830	0,859	0,818	0,792	0,838	0,839	0,835
16	0,853	0,840	0,853	0,853	0,850	0,826	0,846	0,833	0,820	0,820	0,831	0,840
17	0,854	0,833	0,840	0,846	0,840	0,836	0,841	0,820	0,820	0,791	0,827	0,838
18	0,836	0,836	0,851	0,842	0,828	0,827	0,843	0,843	0,828	0,780	0,780	0,730
19	0,718	0,700	0,686	0,713	0,701	0,721	0,736	0,762	0,774	0,799	0,758	0,731
20	0,721	0,735	0,706	0,692	0,693	0,705	0,703	0,716	0,703	0,660	0,644	0,640
21	0,647	0,643	0,666	0,681	0,667	0,658	0,681	0,708	0,708	0,696	0,696	0,696
22	0,716	0,657	0,657	0,641	0,654	0,665	0,665	0,708	0,720	0,697	0,658	0,666
23	0,666	0,685	0,710	0,710	0,717	0,728	0,728	0,787	0,799	0,822	0,813	0,813
24	0,813	0,826	0,826	0,768	0,803	0,813	0,800	0,827	0,819	0,797	0,821	0,802

$y_i$	$\hat{y}_i$
8	0,678
9	0,780
10	0,800
10	0,800
9	0,763
9	0,794
9	0,831
11	1,001
11	1,036
11	1,033
11	1,037
12	1,038
11	0,929
10	0,821
10	0,837
10	0,839
10	0,832
10	0,819
9	0,733
8	0,693
8	0,679
8	0,675
9	0,748
10	0,810

$y_{..}$   
 $\hat{y}_{..}$

234  
0,834

Tomando los datos de la Tabla 4 se desarrolla la tabla ANOVA correspondiente al día 1 (Lunes) como se observa en la Tabla 5.

**Tabla 5. Tabla Anova Día 1 (Lunes) para determinar si existen variaciones de caudal con respecto a la hora del día.**

TABLA ANOVA PARA DIA 1						
FUENTE DE VARIACION	SS	FD	MS	F	Fo	Pvalue
TRATAMIENTOS	3	23	0,118	2,890	1,57029353	0,000023 <b>SIGNIFICATIVO</b>
ERROR	11	264	0,041			
TOTAL	13	287				

HIPOTESIS NULA: NO EXISTE VARIACION DE CAUDAL ZONA 1 DURANTE EL DIA (LUNES).

HIPOTESIS ALTERNATIVA: EXISTE VARIACIÓN DE CAUDAL ZONA 1 LOS DIAS LUNES

CONCLUSIONES

SE RECHAZA LA HIPOTESIS NULA, EXISTE VARIACION DE CAUDAL ZONA 1 CON RESPECTO A LA HORA DEL DIA 1 (LUNES)

RECOMENDACIÓN: HACER ANALISIS DE BLOQUES

En la tabla 5 se puede observar que si existe variación de la demanda de caudal con respecto a la hora del día. De forma semejante se procede a realizar el mismo experimento para el resto de días de la semana.

Se procedió a replicar el experimento tomando datos de los demás días de la semana partiendo de la hipótesis nula que no existe variación en la demanda de caudal con respecto a la hora del día. En la Tabla 6 se resumen las conclusiones de cada ANOVA desarrollada y se aprecia que la conclusión común de rechazo de la hipótesis nula en todos los días de la semana.

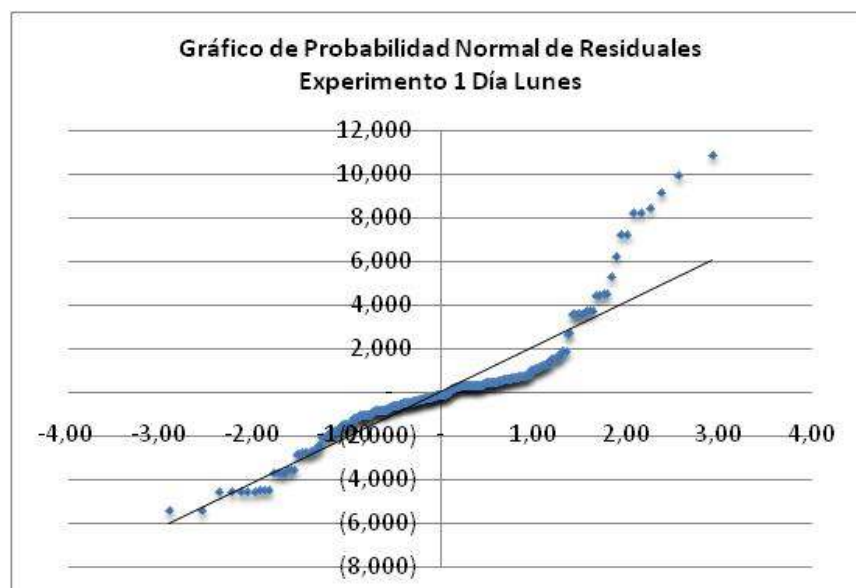
**Tabla 6. Resumen de tablas ANOVA de experimento para determinar si existe variación de caudal con respecto a la hora del día.**

RESUMEN DE TABLAS ANOVA PARA 1 SEMANA DE OPERACIÓN					
Ho	EL CAUDAL NO VARIA CON RESPECTO A LA HORA DEL DIA				
H1	EL CAUDAL VARIA CON RESPECTO A LA HORA DEL DIA				
DIA	F	Fo	Pvalue	CONCLUSION	
LUNES	2,9	1,6	0,00002	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
MARTES	2,0	1,6	0,00420	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
MIÉRCOLES	2,8	1,6	0,00005	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
JUEVES	2,6	1,6	0,00011	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
VIERNES	3,1	1,6	0,00001	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
SÁBADO	2,3	1,6	0,00117	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
DOMINGO	4,0	1,6	0,00000	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho

Aunque los estadísticos F son superiores al estadístico  $F_0$ , el margen de diferencia es pequeño por lo tanto es importante verificar la validez del experimento.

Verificación de validez del experimento 1.

Debido al bajo margen de diferencia entre los estadísticos F y  $F_0$ , se procede a realizar la validación del primer experimento mediante la grafica de los residuales vs tratamientos y verificación del supuesto de normalidad.



**Ilustración 16. Gráfico de probabilidad normal de residuales para verificar el supuesto de normalidad del experimento día 1 (Lunes)**

Tal como se observa en la Ilustración 17 no se cumple el supuesto de normalidad de los residuos para el experimento. Para determinar las posibles causas del no cumplimiento se requiere seguir revisando los residuales. En la ilustración 18 se puede apreciar la alta variabilidad de los residuales en los tratamientos 1, 6, 7, 13, 19, 20 y 23. Estas variabilidades se originan cuando el sistema de bombeo se altera por fallas en la maquinaria o por manipulación de para ajustar la capacidad de la maquinaria a la demanda de caudal del sistema. Durante esas maniobras se presentan zonas de transición que interrumpen la continuidad del comportamiento de las variables analizadas. Para el éxito del experimento es necesario identificar esas perturbaciones y de ser posible determinar las frecuencias a las que se están presentando.



Ilustración 17. Residuales con respecto al tratamiento (hora del día). En los óvalos resaltados se pueden apreciar las zonas de transición del sistema de bombeo.

En la tabla 7 están disponibles los datos para realizar replica del experimento 1 pero sin las zonas de transición detectadas durante la verificación de ajuste de los residuales. De los 24 niveles o tratamientos se dejaron 18 válidos. Se realizó nuevamente la tabla ANOVA 1 y se verificó el supuesto de normalidad de los residuales.

Tabla 7. Datos de flujo para el día 1 (lunes) filtrando los datos de las zonas de transición identificados.

		Replica												y <sub>i</sub>	ŷ <sub>i</sub>
Nivel		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	2	0,752	0,756	0,753	0,730	0,769	0,787	0,777	0,781	0,814	0,817	0,812	0,815	9	0,780
2	3	0,795	0,811	0,821	0,844	0,865	0,815	0,801	0,761	0,765	0,775	0,767	0,786	10	0,800
3	4	0,788	0,799	0,785	0,768	0,778	0,787	0,766	0,789	0,798	0,851	0,861	0,833	10	0,800
4	5	0,820	0,770	0,758	0,758	0,756	0,744	0,743	0,753	0,773	0,752	0,769	0,761	9	0,763
5	6	0,760	0,770	0,755	0,772	0,771	0,772	0,772	0,804	0,802	0,839	0,843	0,837	9	0,794
6	9	1,033	1,030	1,064	1,061	1,046	1,032	1,027	1,042	1,031	1,002	1,020	1,038	11	1,036
7	10	1,042	1,042	1,025	1,040	1,047	1,048	1,048	1,044	1,054	1,016	0,995	1,005	11	1,033
8	11	1,004	1,007	1,015	1,024	1,026	1,037	1,037	1,027	1,044	1,052	1,064	1,073	11	1,037
9	14	1,065	0,819	0,832	0,819	0,827	0,824	0,808	0,801	0,833	0,809	0,832	0,828	10	0,841
10	15	0,840	0,850	0,840	0,850	0,848	0,830	0,859	0,818	0,792	0,838	0,839	0,835	10	0,837
11	16	0,853	0,840	0,853	0,853	0,850	0,826	0,846	0,833	0,820	0,820	0,831	0,840	10	0,839
12	17	0,854	0,833	0,840	0,846	0,840	0,836	0,841	0,820	0,820	0,791	0,827	0,838	10	0,832
13	18	0,836	0,836	0,851	0,842	0,828	0,827	0,843	0,843	0,828	0,780	0,780	0,730	10	0,819
14	20	0,718	0,735	0,706	0,692	0,693	0,705	0,703	0,716	0,703	0,660	0,644	0,640	8	0,693
15	21	0,647	0,643	0,666	0,681	0,667	0,658	0,681	0,708	0,708	0,696	0,696	0,696	8	0,679
16	22	0,716	0,657	0,657	0,641	0,654	0,665	0,665	0,708	0,720	0,697	0,658	0,666	8	0,675
17	23		0,685	0,710	0,710	0,717	0,728	0,728	0,787	0,799	0,822	0,813	0,813	8	0,756
18	24	0,666	0,826	0,826	0,768	0,803	0,813	0,800	0,827	0,819	0,797	0,821	0,802	10	0,797
														y <sub>-</sub>	173
														ŷ <sub>-</sub>	
															0,823



Ilustración 18. Residuales vs Tratamientos para datos filtrados día 1 (Lunes)

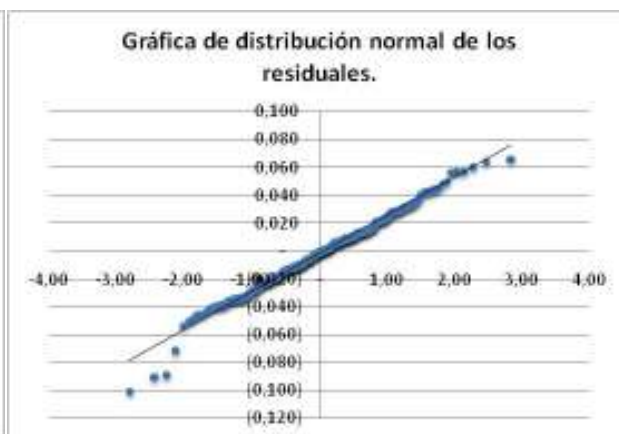


Ilustración 19. Verificación del supuesto de normalidad de los residuales para los datos filtrados del día 1 (lunes)

Una vez eliminadas las zonas de transición que estaban produciendo perturbaciones en el experimento se puede observar en la Ilustración 20 el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuales para validar el experimento. Igualmente podemos observar en la ilustración 19 que la variabilidad de los residuales por nivel de tratamiento disminuyó considerablemente con respecto a la ilustración 18.

Se realizaron réplicas del experimento para el resto de los días de la semana encontrando zonas de alta variabilidad del error producto de maniobras de operación para ajustar la capacidad de la estación a los requerimientos de la red de distribución. Estas zonas de transición serán eliminadas para desarrollar datos más confiables que generen modelos estadísticos con baja incertidumbre.

Al filtrar las zonas de transición para el resto de días de la semana de muestreo se procedieron a repetir la tabla ANOVA y los resultados se pueden ver en la tabla 8.



Tabla 8. Resumen de tablas ANOVA para determinar variación de caudal durante el día para cada día de la semana.

<b>RESUMEN DE TABLAS ANOVA PARA 1 SEMANA DE OPERACIÓN REPLICA EXP. 1</b>					
<b>Ho</b>	EL CAUDAL NO VARIA CON RESPECTO A LA HORA DEL DIA				
<b>H1</b>	EL CAUDAL VARIA CON RESPECTO A LA HORA DEL DIA				
<b>DIA</b>	<b>F</b>	<b>Fo</b>	<b>Pvalue</b>	<b>CONCLUSION</b>	
<b>LUNES</b>	2,3	1,7	0,00329	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
<b>MARTES</b>	1,9	1,7	0,02968	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
<b>MIÉRCOLES</b>	2,7	1,8	0,00190	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
<b>JUEVES</b>	2,5	1,7	0,00116	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
<b>VIERNES</b>	3,0	1,7	0,00010	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
<b>SÁBADO</b>	3,4	1,7	0,00001	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho
<b>DOMINGO</b>	4,0	1,6	0,00000	SIGNIFICATIVO	RECHAZA Ho

Los resultados de la réplica del análisis de varianza de la tabla 8 permiten concluir que sí existe variación del caudal con respecto a la hora del día. A pesar de eso no se puede descartar aún la hipótesis que existen dos o más zonas de operación o patrones de demanda dentro de un mismo día. La demanda de consumo de agua potable puede tener un comportamiento variable que es máximo durante el día y es mínimo en las horas de la noche. Adicionalmente existe la información que la zona 1 abarca el centro de comercio de la ciudad y gran parte de la zona industrial de la vía 40 por lo que se presume que el día Domingo es diferente al resto de la semana. En resumen es necesario profundizar el experimento para determinar si existen zonas de operación por día mediante análisis de bloques y comparar el domingo con el resto de los días mediante análisis de varianza.

#### 3.4.4. Análisis de bloques para determinar las zonas de operación por día y entre días de la semana.

Existe la hipótesis alternativa que durante los 24 niveles u horas de operación por día se presentan dos zonas de operación que obedecen a los hábitos de consumo de la población. Los servicios de acueducto a nivel nacional presentan un patrón de demanda donde el consumo es máximo durante el día y mínimo durante la noche. Para ello se considera realizar un análisis de bloques sobre los datos con que se realizó el experimento.

Para realizar el análisis con bloques se seleccionarán varias horas de día y varias horas de noche de distintos días. Finalmente se analizará el comportamiento de los demás días y se compararán con el comportamiento del día Domingo.

Se extrajeron los datos asociados a las horas de la mañana y de la noche para los días de la semana y los días domingo. Se organizaron los bloques “Día” y “Noche” con los tratamientos “Días de Semana” y “Domingo” tal como se ve en la tabla 9

**Tabla 9. Datos y organizados para análisis de bloques para determinar si existe variación en un mismo día y entre varios días de la semana.**

DATOS PARA DETERMINAR LA EXISTENCIA DE ZONAS DE OPERACIÓN Y VERIFICAR QUE EL DOMINGO TIENE UN COMPORTAMIENTO DIFERENTE A LOS DEMAS DIAS												
	DIA						NOCHE					
DIA DE SEMANA	1,036	0,959	0,997	0,988	0,990	0,971	0,675	0,698	0,791	0,746	0,799	0,743
DOMINGO	1,059	1,051	0,974	0,993	1,020	1,027	0,780	0,790	0,814	0,795	0,760	0,800
	y.j						12,065					
							9,193					
							y..					
							21,258					

Se procesaron los datos para construir la tabla Anova 9 con sus respectivas conclusiones que se puede resumir en que existe diferencia en el consumo de agua potable entre los días ordinario de semana y el día domingo. Sin embargo existe una variación más significativa entre el caudal consumido del día con respecto a la noche.

**Tabla 10. Tabla Anova con análisis de bloques para determinar variación entre las horas del día y entre los días de la semana con respecto al domingo.**

TABLA ANOVA PARA DETERMINAR LA EXISTENCIA DE ZONAS DE OPERACIÓN Y VERIFICAR QUE EL DOMINGO TIENE UN COMPORTAMIENTO DIFERENTE A LOS DEMAS DIAS						
FUENTE DE VARIACION	SS	FD	MS	F	Fo	Pvalue
TRATAMIENTOS	0,0092	1	0,009	9,100	4,84433567	0,011726
BLOQUES	0,3556	11	0,032	31,846		
ERROR	0,0112	11	0,001			
TOTAL	0,3760	23				

HIPOTESIS NULA: NO EXISTE VARIACION DE CAUDAL ZONA 1 LOS DOMINGOS CON RESPECTO A LOS DIAS DE SEMANA  
 HIPOTESIS NULA: NO EXISTE VARIACION DE CAUDAL ZONA 1 ENTRE LAS DIFERENTES ZONAS DEL DÍA POR LOS HABITOS DE  
 HIPOTESIS ALTERNATIVA: EXISTE VARIACIÓN DE CAUDAL ENTRE LOS DÍAS DE SEMANA Y LOS DÍAS DOMINGO  
 HIPOTESIS ALTERNATIVA: EXISTE UNA VARIACIÓN DE CONSUMO DURANTE EL DIA PRODUCTO DE LOS HABITOS DE CONSUMO  
 CONCLUSIONES  
 SE RECHAZA LAS DOS HIPOTESIS NULA, EXISTE VARIACION DE CAUDAL ZONA 1 CON RESPECTO A LA HORA DEL DIA Y EXISTE

Si comparamos los estadísticos F entre la tabla ANOVA 10 con los de la tabla ANOVA 5 es evidente la diferencia que se presenta cuando se hace análisis de

bloques. Esto será de mucha utilidad para realizar los modelos de regresión entre las variables de operación de la red de distribución.

#### **3.4.5. Modelo de regresión de variables de operación.**

Una vez analizados los datos de comportamiento de la red de distribución mediante los análisis de varianza se pueden empezar a hacer las regresiones que permitan relacionar las variables de operación Presiones, Caudales, Potencia. El dato de Potencia será la potencia hidráulica a la salida del sistema de bombeo. La potencia eléctrica no será considerada inicialmente para aislar las perturbaciones producto de condiciones operacionales de motores, bombas, regulación de válvulas, etc...

Las variables Potencia Hidráulica, Presión y Caudal servirán para desarrollar la investigación de la red de distribución. A partir de una buena investigación se podrá determinar los puntos de operación que permitan optimizar el consumo de potencia hidráulica. Una vez determinada la potencia hidráulica óptima para las diferentes zonas de operación será posible hacer comparaciones con respecto al consumo de energía existente y al consumo de energía con el equipo de bombeo ideal para el sistema.

La variable que sirve de indicador de estado en la red de distribución es el valor de presión en uno de los puntos de inspección remoto (PIR, punto de inspección remota por telemetría). Los administradores del sistema de bombeo identifican un PIR crítico en cada zona de bombeo y le asignan un valor de consigna mínimo. Los datos de presión de los PIR y de la estación de bombeo son almacenados en el sistema SCADA desde donde es posible extraer los datos para analizar los experimentos.

**3.4.6. Potencia hidráulica en función de la presión mínima permitida de consigna de un punto crítico de la red de distribución para sistema de bombeo zona 1 de acueducto de Barranquilla.**

El punto crítico según consultas a los ingenieros que administran la red de distribución Zona 1 de Barranquilla es el indicador de presión PCC instalado en la cota más alta del sistema. Por lo tanto la Potencia Hidráulica debe quedar en función del PIR PCC.

**Ecuación 6**

$$\text{Potencia Hidráulica: } f(PCC)$$

Para determinar la Potencia Hidráulica es necesario obtener los datos de la presión de salida de la estación de bombeo (Palta) y el caudal de salida de la estación de bombeo (QZ1) de acuerdo a la ecuación:

**Ecuación 7**

$$\text{Potencia Hidráulica} = \gamma * Q * H$$

Dónde,

$\gamma$ , peso específico del fluido en nuestro caso el agua en unidades del Sistema Internacional Newton/metro<sup>3</sup>.

$Q$ , caudal del fluido que para el estudio corresponde al caudal de salida QZ1 en metros<sup>3</sup>/seg.

$H$ , cabeza o presión del sistema que en nuestro caso es Palta en metros.

De tal forma que la ecuación Z queda de la siguiente manera:

**Ecuación 8**

$$\text{Potencia Hidráulica} = \gamma * QZ1 * PAlta$$

Donde,

*Potencia Hidráulica*, en unidades de kiloWattios.

$\gamma$ , en unidades de Newton / metro cúbico.

$QZ1$ , en unidades de metros cúbicos por segundo.

$PAlta$ , en unidades de metro.

Dado que el objetivo principal de la investigación está enfocado a la optimización de consumos de energía para suministro de agua potable a la red de distribución, es necesario agrupar los modelos desarrollados en un gran modelo que determine el consumo de energía en función de la presión crítica de la red teniendo en cuenta las zonas de operación delimitadas.

Como el objetivo del estudio es determinar la Potencia requerida para determinado valor de presión de consigna crítico es necesario que la ecuación 9 quede expresada en función de PCC:

#### Ecuación 9

$$Potencia\ Hidráulica\ (PCC) = \gamma * QZ1(PCC) * PAlta(PCC)$$

#### 3.4.7. Regresión de la presión de estación de bombeo en función de la presión crítica de la red.

En la ilustración 21 se ilustra la relación existente entre presión de salida *PAlta* y la presión crítica de la red de distribución *PCC*. También se puede apreciar que la relación entre estas variables cambia dependiendo del horario o zona de operación diurna o nocturna.

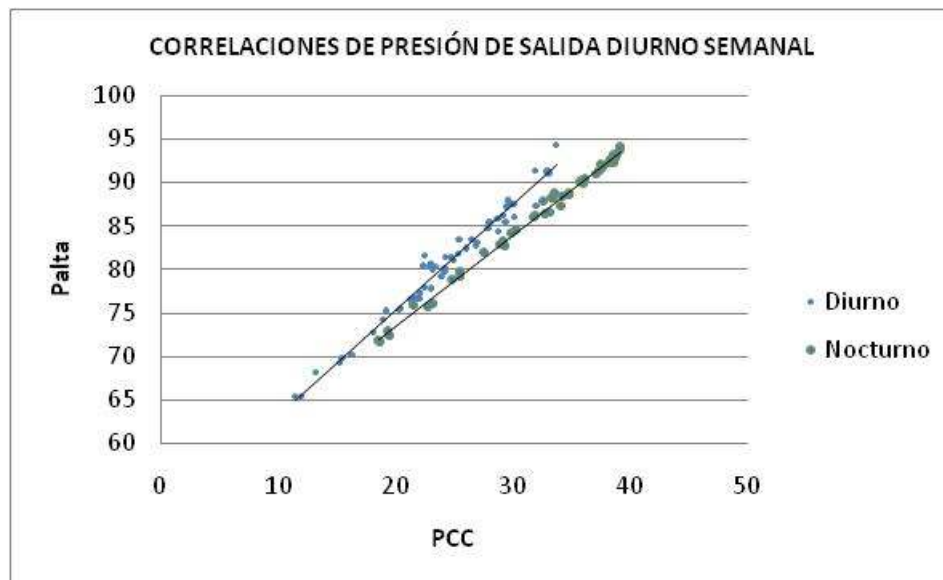


Ilustración 20. Relación entre la presión de salida de la estación (PAlta) y la presión en el punto crítico de la red (PCC) cumplen una función lineal que varía dependiendo del horario o zona de operación.

Utilizando los datos de la ilustración 21 se utilizó la herramienta de Análisis de Datos de Excel para las zonas de operación diurna y nocturna. Se utilizaron los modelos cuadrático y lineal siendo este último el más ajustado a los datos de presión del sistema. En la tabla 11 se puede observar los valores del intercepto (51.23) y del coeficiente (1.24) a través de los cuales se determina la ecuación 10. En la misma tabla se pueden observar los estadísticos  $F_0$  y los coeficientes necesarios para validar el modelo de regresión.

**Tabla 11. Análisis de regresión para determinación de la presión de salida de la estación de bombeo (Palta) en función de la presión del PIR (PCC) durante las horas del día.**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.964
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.929
R <sup>2</sup> ajustado	0.929
Error típico	1.500
Observaciones	666

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	19,706.36	19,706.36	8,754	0
Residuos	664	1,494.70	2.25		
Total	665	21,201.06			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	51.23	0.37	136.78	-	50.49	51.96	50.49	51.96
PCC	1.24	0.01	93.56	-	1.22	1.27	1.22	1.27

**Tabla 12. Análisis de regresión para determinación de la presión de salida de la estación de bombeo (Palta) en función de la presión del PIR (PCC) durante las horas de la noche.**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.96
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.93
R <sup>2</sup> ajustado	0.93
Error típico	1.07
Observaciones	565

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	8,216.25	8,216.25	7,152	0.0000
Residuos	563	647	1.15		
Total	564	8,863			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	54.24	0.36	152.41	-	53.54	54.94	53.54	54.94
PCC	1.00	0.01	84.57	-	0.98	1.02	0.98	1.02

En la tabla 12 se observa el resultado del modelo de regresión más preciso para la zona de operación nocturna. Se puede observar la diferencia existente entre los coeficientes de las tablas 11 y 12. En el modelo nocturno el coeficiente de PCC es

menor que en el modelo diurno, es decir que para un incremento  $\Delta P_{ALTA}$  en la salida de la estación de bombeo se producirá un incremento  $\Delta PCC$  más elevado en la noche que en el día. También se puede interpretar que ante un mismo valor de presión  $P_{ALTA}$  las presiones del sistema de tuberías en el punto  $PCC$  son más altas en la noche que en el día.

Las ecuaciones finales que relacionan la presión de salida de la estación  $P_{ALTA}$  con la presión del punto  $PCC$  de la red de distribución están dadas por:

**Ecuación 10. Modelo de regresión de Palta en función de PCC para zona de operación diurna.**

$$P_{alta\ diu} = 51.23 + 1.24 PCC$$

y

**Ecuación 11. Modelo de regresión de Palta en función de PCC para zona de operación nocturna.**

$$P_{alta\ noct} = 54.24 + PCC$$

Donde,

$P_{ALTA}$ , es la presión de salida de la estación de bombeo en PSIG.

$PCC$ , es la presión en un punto de la red de distribución (PIR) en PSIG.

Las ecuaciones 10 y 11 demuestran que para alcanzar un  $PCC$  deseado se requiere una presión determinada en la salida de la estación de bombeo, la cual deberá ser más alta en el día con respecto a la noche para satisfacer el mismo valor de presión de  $PCC$ . Igualando los  $PCC$  en ambas ecuaciones nos queda:

**Ecuación 12. Relación entre las presiones día y noche para un mismo valor de presión de red en PCC**

$$P_{alta\ diu} = 1.24 \cdot P_{alta\ noct} - 16.03$$

### **3.4.8. Regresión del caudal $QZ1$ de salida de la estación de bombeo en función de la presión crítica de la red $PCC$ .**

A partir de los datos almacenados en el SCADA para los días de análisis se determinó el modelo de regresión para relacionar el caudal de salida de la estación de bombeo  $QZ1$  en función de la presión de un punto de la red de distribución  $PCC$ . Inicialmente se suprimieron los datos registrados durante los estados transitorios y se realizaron los análisis de regresión para modelo lineal,

cuadrático y exponencial. Para la zona de operación operación diurna, el modelo regresión exponencial fue el que presentó menores errores con respecto a los modelos lineal y cuadrático.

La ecuación propuesta obedece de la siguiente forma:

**Ecuación 13. Ecuación propuesta para obtener modelo de QZ1 en función de PCC.**

$$P_{ALTA} - c = a \cdot QZ1^b$$

Donde,

$P_{ALTA}$ , presión de salida de la estación de bombeo en psig.

$QZ1$ , caudal de salida de la estación de bombeo en  $\frac{m^3}{seg}$ .

En la ecuación 13 utilizada para determinar el modelo de QZ1 se utilizó el término independiente “c” tal que cuando no exista flujo de salida en la estación de bombeo (  $QZ1 = 0$  ) la presión  $P_{ALTA}$  será igual a la presión hidrostática en la salida de la estación de bombeo cuyo valor es 38 psig.

En la tabla 13 se presentan los resultados del análisis de datos con el valor del coeficiente y el intercepto del modelo al igual que los estadísticos de la regresión.

**Tabla 13. Resultado del análisis de datos diurnos para determinar modelo de regresión de QZ1 en función de la presión de la red de distribución en el PIR PCC.**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.751
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.565
R <sup>2</sup> ajustado	0.564
Error típico	0.082
Observaciones	666

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	Valor crítico de F
Regresión	1	5.80	5.80	861	5.6006E-122
Residuos	664	4.48	0.01		
Total	665	10.28			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3.86	0.00	1,213.64	-	3.86	3.87	3.86	3.87
Variable X 1	1.32	0.05	29.34	0.00000	1.23	1.41	1.23	1.41

Para la zona de operación nocturna se realizó el mismo procedimiento de la zona diurna, el resultado se puede observar en la tabla 14.



**Tabla 14. Resultado del análisis de datos nocturnos para determinar modelo de regresión de QZ1 en función de la presión de la red de distribución en el PIR PCC.**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coef Pearson	0.98
R^2	0.96
R^2 ajustado	0.96
Error típico	0.12
Observaciones	607

ANÁLISIS DE VARIANZA					
SoV	dof	SS	MS	Fo	P-value
Regresión	1	198.93	198.93	14,141	0
Residuos	605	9	0.01		
Total	606	207			

	Coeficientes	Error típico	to	P-value	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	4.19	0.01	661.76	-	4.17	4.20	4.17	4.20
LN(QZ1)	1.48	0.01	118.91	-	1.46	1.50	1.46	1.50

De acuerdo a los análisis de regresión entre el flujo *QZ1* y la presión *PCC* se utilizarán los siguientes modelos:

**Ecuación 14. Modelo para determinar el flujo diurno de salida de la estación de bombeo QZ1 en función de la presión de un PIR "PCC" de la red de distribución.**

$$QZ1 = \left( \frac{13.23 + 1.24 PCC}{e^{3.86}} \right)^{\frac{1}{1.32}}$$

**Ecuación 15. Modelo para determinar el flujo nocturno de salida de la estación de bombeo QZ1 en función de la presión de un PIRR "PCC" de la red de distribución.**

$$QZ1 = \left( \frac{16.24 + PCC}{e^{4.18}} \right)^{\frac{1}{1.48}}$$

Donde,

*QZ1*, Flujo de salida de la estación de bombeo en  $\frac{m^3}{seg}$ ,

*P<sub>alta noct.</sub>*, Presión de salida a la red de distribución en PSIG.

Mediante la ecuación 13 el modelo fue forzado a cumplir la condición hidrostática cuando el caudal se igualara a cero. Las ecuaciones 14 y 15 fueron ejecutadas para 542 datos reales de PCC obteniendo una media del valor absoluto del error de 5%. Para verificar la validez de la presión hidrostática utilizada se usaron cuatro

modelos forzados que usaron presiones hidrostáticas de 30 psig, 33 psig, 43 psig y 48 psig. A medida que las presiones se alejaban de los 38 psig el valor de la media del error se incrementaba tal como se puede observar en la ilustración 22.

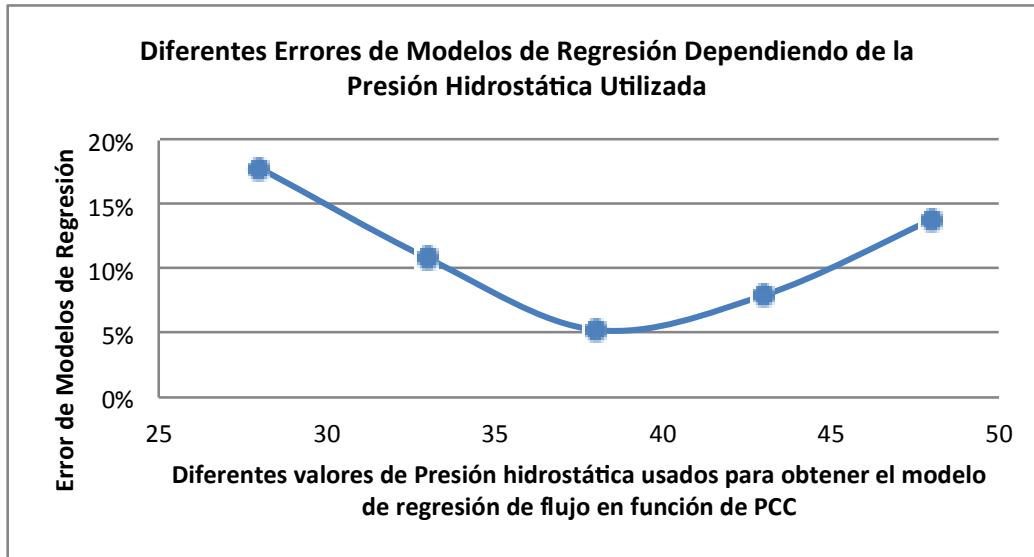


Ilustración 21. Diferentes errores del modelo de regresión de QZ1 en función de PCC para diferentes datos de presión hidrostática.

De acuerdo a los modelos de regresión se puede completar la ecuación 8 para el horario diurno:

#### Ecuación 16

$$Potencia Hidráulica (PCC) = \gamma * 0.7 * (51.23 + 1.24 PCC) * \left( \frac{13.23 + 1.24 PCC}{e^{3.86}} \right)^{\frac{1}{1.32}}$$

y para el horario nocturno:

#### Ecuación 17

$$Potencia Hidráulica (PCC) = \gamma * 0.7 * (54.23 + PCC) * \left( \frac{16.24 + PCC}{e^{4.18}} \right)^{\frac{1}{1.48}}$$

Donde,

*Potencia Hidráulica*, potencia hidráulica de la estación en Watts.

$\gamma$ , peso específico del agua en  $\frac{\text{Newton}}{\text{m}^3}$

*PCC*, Presión de la red de distribución en un PIR en PSIG.

### 3.5. Estados transitorios.

Durante el período de experimentación fue necesario realizar varios análisis de experimentos para clasificar las zonas de operación del sistema y para identificar los datos no validos por alta variabilidad ocasionada por perturbaciones propias de operación y errores de comunicación. Estos casos se daban cuando una o dos variables registraban un cambio significativo mientras las otras variables registraban cambios pasados 1 o más intervalos de tiempo  $t=5$  minutos. Esto ocasionaba la alta variabilidad del error durante la validación del modelo de regresión del aparte 3.4.3.

El la ilustración 23 se identifican las zonas de transición en un día de muestra por cambio en la demanda cuando la transición ocurre entre zonas de operación y por manipulación de equipos cuando ocurre en la misma zona de operación.

día 1 (Lunes)						
hora	PCC	QZ1	Palta	Pmix	Puniv	Potencia
	psig	m3/s	psig	psig	psig	kW
1	32	0,68	86	48	40	400
2	39	0,78	93	51	46	498
3	39	0,80	93	52	46	509
4	38	0,80	92	51	45	505
5	35	0,76	90	48	43	471
6	25	0,79	80	38	33	436
7	23	0,83	79	29	29	449
8	32	1,00	91	28	38	626
9	33	1,04	91	27	38	648
10	33	1,03	91	25	39	645
11	30	1,04	88	26	34	623
12	33	1,04	91	26	37	650
13	23	0,93	82	26	30	520
14	21	0,82	77	26	27	431
15	20	0,84	75	25	27	433
16	20	0,84	75	25	27	434
17	19	0,83	74	26	26	424
18	13	0,82	68	26	22	383
19	13	0,73	65	29	21	329
20	15	0,69	69	32	24	328
21	19	0,68	72	35	27	337
22	22	0,68	76	36	29	351
23	32	0,75	86	40	38	443
24	35	0,81	89	42	41	493

	Zona Operación Nocturna
	Zona Operación Diurna
	Horas de rotación de válvulas o bombas

**Ilustración 22. Clasificación de las dos zonas de operación identificadas del sistema para un día de la semana. Las zonas color gris entrega datos no válidos para el análisis producto de las perturbaciones ocasionadas durante el ajuste de la maquinaria al sistema.**



Ilustración 23. Gráfico de comportamiento de variables de operación durante una rotación de equipos de bombeo. Este tipo de datos fueron filtrados para mejorar el modelo de regresión.

En la ilustración 24 se observa que en el instante  $t=2$  se produjo una modificación en la presión de salida de la estación de bombeo Palta, el cambio se registró en el instante  $t=3$  de PCC y la señal de flujo QZ1 solo pudo estabilizarse a partir de  $t=12$ . Durante el intervalo 3 al 12 fue necesario suprimir los datos para construir un modelo de regresión confiable.

Las perturbaciones o cambios en las condiciones del proceso estaban siendo originadas por:

- Manipulación de válvulas y bombas del sistema de bombeo:

Este caso se puede visualizar en la ilustración 25, la señal Palta es la primera en actualizarse mientras que PCC se actualiza pasados 5 minutos debido a los tiempos muertos por comunicación. El valor de Caudal QZ1 tarda 6 intervalos de 5 minutos en estabilizarse por factores adicionales como el golpe de ariete y la sensibilidad del tipo de sensor de flujo instalado.

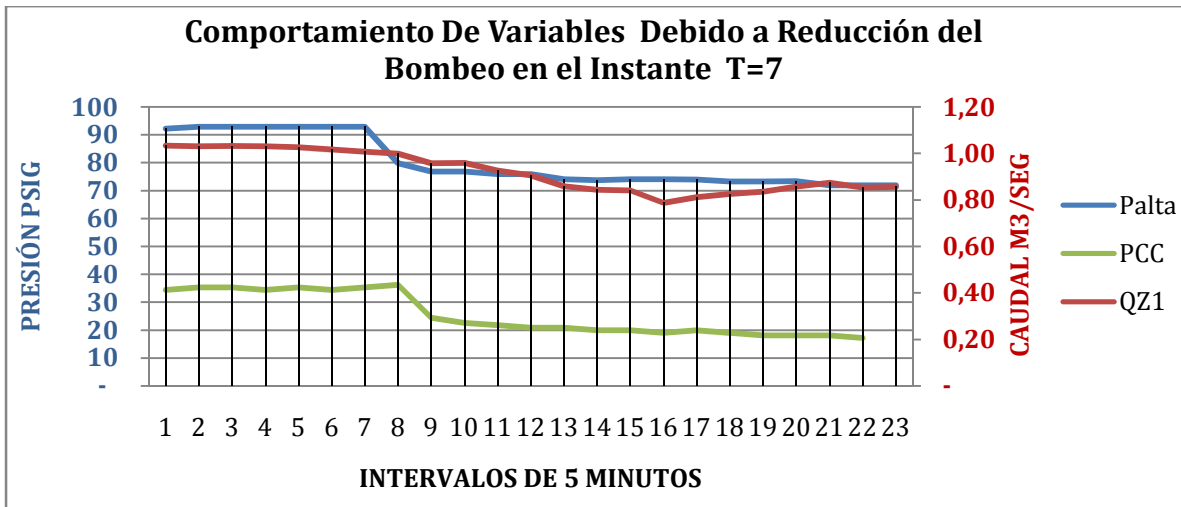


Ilustración 24. Estados transitorios detectados en la investigación. Tiempos de respuesta de variables de operación ante una manipulación de válvulas en el sistema de bombeo. La respuesta de Palta (ubicada en la estación) es la más rápida con respecto a PCC y QZ1.

En la ilustración 26 se observa un incremento en la presión de salida de la estación de bombeo Palta en  $t=7$  y solo hasta el instante  $t=21$  la señal de flujo QZ1 logra estabilizarse.

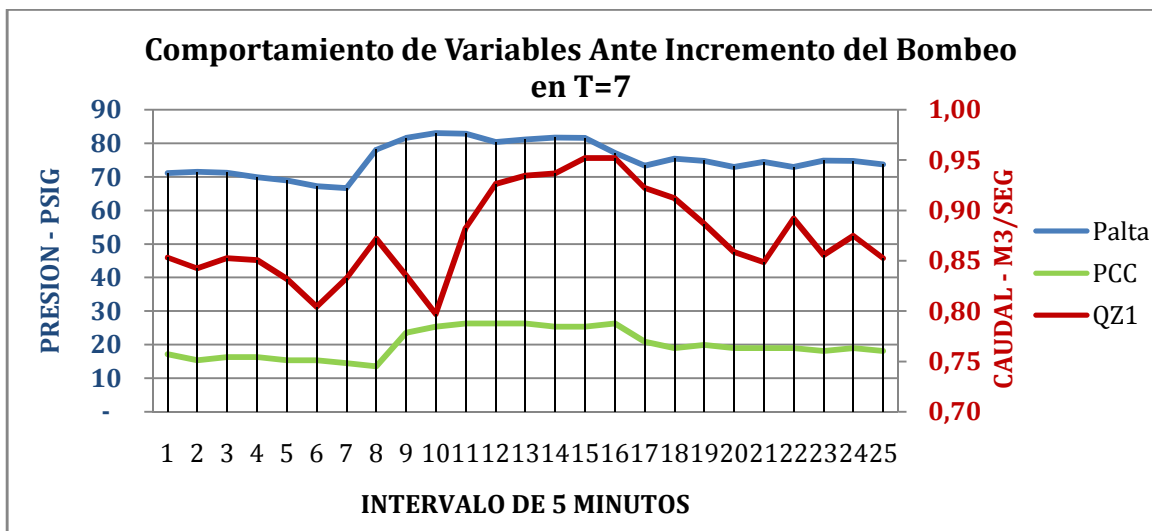


Ilustración 25. Respuesta de cada una de las variables ante incremento en el bombeo. La primera en reaccionar es la señal Palta mientras que QZ1 es la menor por fenómenos hidráulicos.

- Cambios en la demanda de la red de distribución de agua potable.

Este caso se puede visualizar en la ilustración 27, donde se puede apreciar que la demanda empieza a disminuir en el momento  $t=4$  y cuando las variables

de presión Palta y PCC incrementan mientras el flujo QZ1 disminuye. En el instante  $t=15$  la variable PCC baja su valor debido a una regulación en el sistema de bombeo y se puede apreciar que PCC responde en  $t=16$  por el retraso de comunicación y la variable QZ1 registra una inestabilidad por el fenómeno de golpe de ariete e inestabilidad de los sensores de flujo.

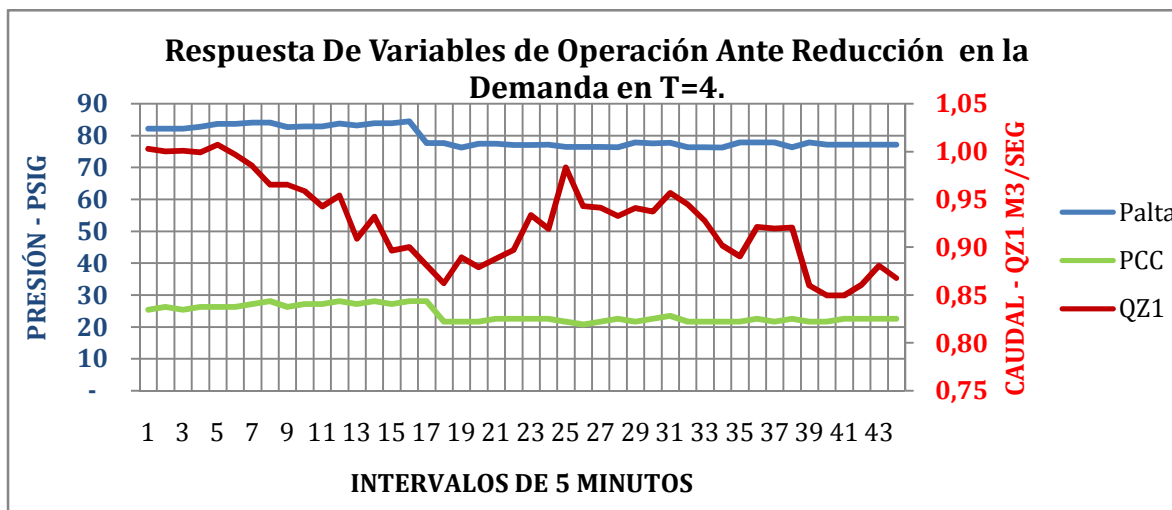


Ilustración 26. Respuesta de las señales de las variables QZ1, Palta y PCC debido a disminución de la demanda de la red de distribución entre  $t=5$  y  $t=15$ .

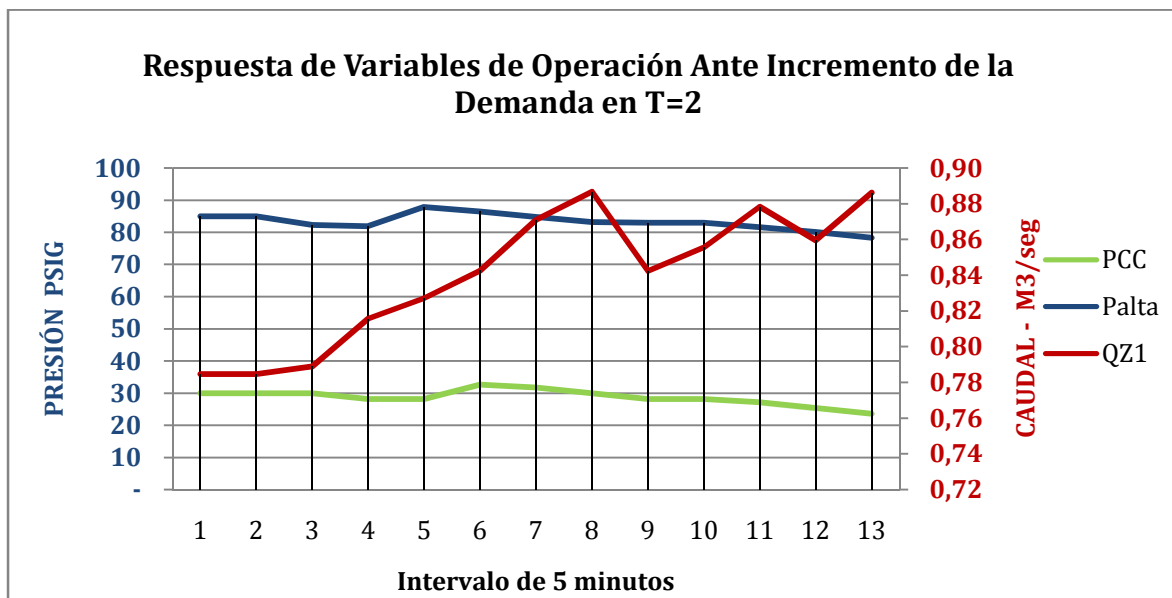


Ilustración 27. Respuesta de las variables de operación ante un incremento de la demanda en  $t=2$ . Las presiones disminuyen mientras el flujo incrementa hasta que en el instante  $t=4$  la estación incrementa el caudal, posteriormente las presiones siguen a la baja.

En la ilustración 28 se muestra el comportamiento del incremento de la demanda a las 6 de la mañana. Se puede observar el incremento en el flujo de salida de la

estación y la disminución de las presiones tanto en la estación (Palta) como en la red de distribución (PCC) evidenciando el clásico comportamiento de la(s) bomba(s) al desplazarse a la derecha de su curva, en el instante  $t=4$  se incrementa la presión Palta producto de la adición de una bomba en paralelo o a la apertura de una válvula de la estación lo cual satisface la creciente demanda hasta el instante  $t=8$  en que la demanda se incrementa nuevamente evidenciando una tendencia al alza.

#### **4. Validación y análisis del modelo para reducir energía en estaciones de bombeo.**

La modelación del consumo de energía de una red de distribución basado en presiones constituye una alternativa para calcular y reducir los consumos de energía de los sistemas de acueducto en las municipalidades donde utilicen sistemas de bombeo. Por ello se propone validar el modelo con los datos de un sistema real en diferentes escenarios y después darle paso a las simulaciones proyectadas con los ahorros de energía esperados.

##### **4.1. Validación del modelo.**

Se procede a validar el modelo mediante la utilización de los registros de las variables de operación del sistema SCADA que sirvieron para determinar el modelo de regresión de las ecuaciones 16 y 17.

##### **4.1.1. Validación del modelo de regresión diurno.**

Para validar el modelo de regresión diurno se utilizó una muestra de 539 datos estables disponibles para calcular la Potencia Hidráulica real de la red de distribución. Para determinar los Potencia Hidráulica ajustada se utilizó la ecuación 16:

$$Potencia\ Hidráulica\ (PCC) = \gamma * 0.7 * (51.23 + 1.24\ PCC) * \left( \frac{13.23 + 1.24\ PCC}{e^{3.86}} \right)^{\frac{1}{1.32}}$$

El resultado obtenido en la media del valor absoluto de los residuales fue de 6.0% con respecto a los valores reales de Potencia Hidráulica. En los gráficos 29 y 30 se puede observar que no se evidencia tendencia significativa entre los residuales y el valor ajustado de potencia hidráulica y en la ilustración 30 se evidencia el cumplimiento del supuesto de normalidad. Las ligeras desviaciones en ambos



gráficos obedecen a la presencia de zonas de operación intermedias menos significativas y a factores climatológicos en determinados días de la toma de muestras.

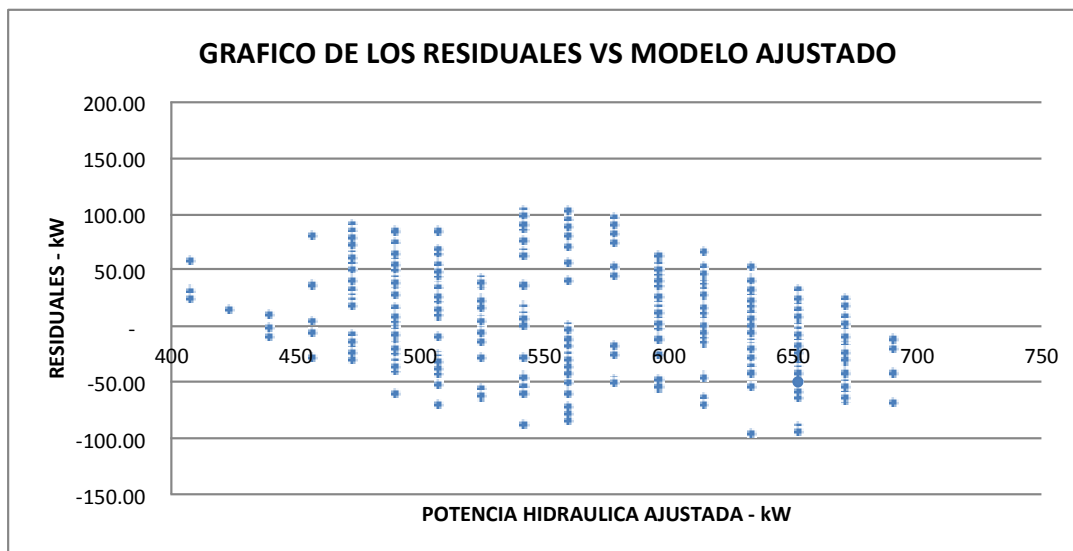


Ilustración 28. Gráfico de residuales vs Potencia Hidráulica ajustada para zona de operación diurna.

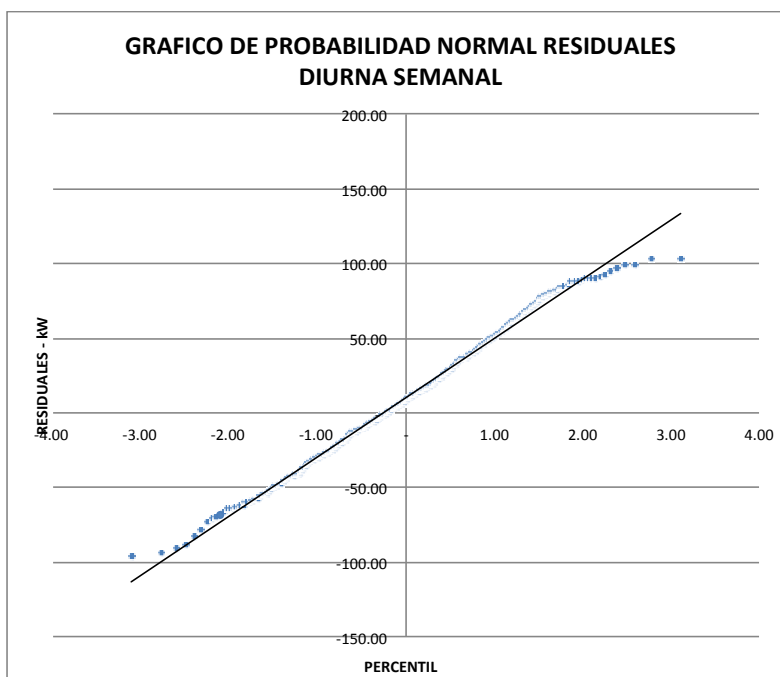


Ilustración 29. Gráfico de probabilidad normal de residuales para validación modelo de regresión Diurno.

#### 4.1.2. Validación del modelo de regresión nocturno.

Para validar el modelo de regresión nocturno se utilizaron 565 datos de presión estación, caudal y presión de red PCC. Se calculó la Potencia Hidráulica real del

sistema de bombeo y se comparó con respecto a la Potencia Hidráulica ajusta bajo el modelo de la ecuación 17:

$$Potencia\ Hidráulica\ (PCC) = \gamma * 0.7 * (54.23 + PCC) * \left( \frac{16.24 + PCC}{e^{4.18}} \right)^{\frac{1}{1.48}}$$

El resultado obtenido en la media de los residuales entre la Potencia real con la ajustada fue de 7.5%. En los gráficos 31 y 32 se puede observar que no se evidencia tendencia entre los residuales con respecto a los valores ajustados y el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuales respectivamente.

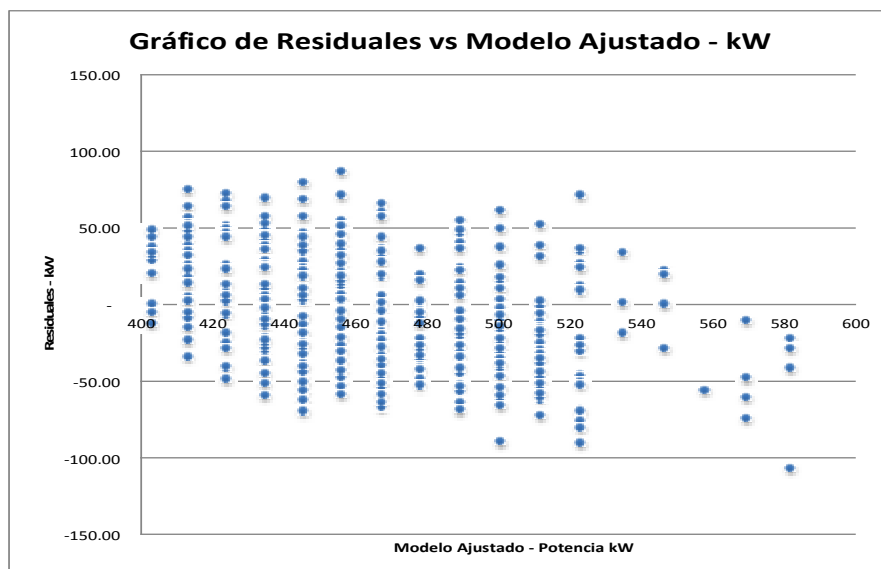


Ilustración 30. Gráfico de residuales vs Potencia Hidráulica ajustada Nocturna.

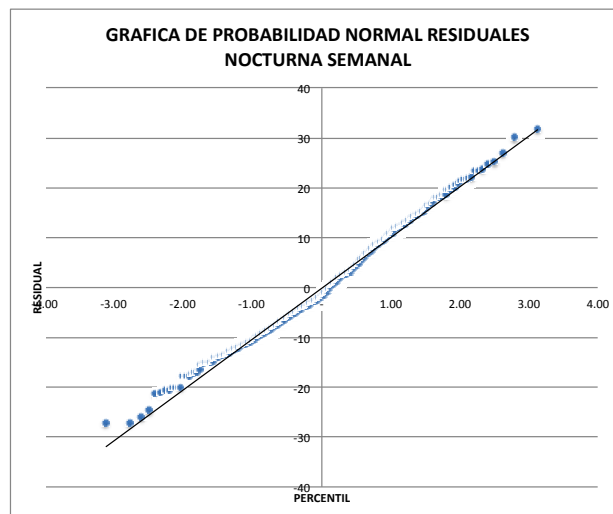


Ilustración 31. Gráfico del supuesto de normalidad de los residuales para validación de modelo zona de operación nocturna.

#### **4.2. Implementación de herramienta computacional para reducir energía en sistemas de bombeo.**

Los modelos de regresión de las ecuaciones 16 y 17 permitieron desarrollar un aplicativo en Matlab donde es posible simular la energía del sistema de bombeo para una red de distribución de agua potable a partir de una consigna de presión. Esta consigna está ubicada en un nodo crítico de la red que el centro de control usa como referencia para diagnosticar el estado de la operación. En función de esta presión de consigna, que para el caso en estudio se denomina PCC, se expresa la potencia hidráulica, el caudal y la presión con la que se debe operar la red de distribución.

Las entradas que solicita el aplicativo son los siguientes:

- Zona de presión o municipio – Matriz de datos.
- Presión de consigna de la red con horas programadas por jornada.
- Tarifa de energía de la estación de bombeo.
- Equipos programados actualmente en la estación de bombeo.

El aplicativo entrega las siguientes salidas:

- Curva de bombas, sistema y punto operación requerido.
- Presión y caudal requerido en la estación de bombeo.
- Búsqueda de la combinación más eficiente de equipos.
- Eficiencia general del sistema de bombeo.
- Variación anual del volumen suministrado a la red.
- Variación anual de la energía si se reemplazaran equipos existentes.

El aplicativo también cuenta con un aparte financiero permitiendo que el modelador pueda cuantificar un futuro proyecto de inversión, para ello debe ingresar:

- Costo total de la inversión requerida.

- Tasa de interés de entidad financiera disponible.
- Plazo del crédito en meses.

Generando los siguientes datos de salida:

- Valor cuota mensual.
- Tasa de retorno de inversión – TIR.

#### **4.2.1. Matriz del sistema.**

El programa funciona seleccionando la matriz correspondiente a la red de distribución a analizar. Cada matriz contiene la información técnica de los equipos de bombeo de cada red de distribución. Las variables de cada bomba están organizada como vectores: Presión, caudal y potencia. La matriz del caso de estudio será ZONA I BARRANQUILLA y posteriormente el modelo servirá para desarrollar estudios en las demás zonas de la ciudad o acueductos de pequeñas municipalidades. En la ilustración 33 se debe pulsar el icono de “Seleccionar Sistema de Bombeo” y se abre una ventana con todas las opciones disponibles de sistemas a analizar.

#### **4.2.2. Presiones de consigna.**

La presión de consigna es la variable crítica a controlar y es suministrada por el ingeniero que administra la red de distribución. En la ilustración 33 se debe ingresar los valores deseados con sus horas de operación. La presión de consigna puede variar de acuerdo al criterio del administrador del sistema teniendo en cuenta la hora del día, el volumen de agua no contabilizada (pérdidas), los requisitos de ley y las quejas de la comunidad por baja o alta presión.

**Ilustración 32. Cuadro de ingreso de las presiones de consigna al aplicativo de Matlab con el número de horas programadas.**

Adicionalmente se debe ingresar datos complementarios para cuantificar ahorros e inversiones en el sistema:

- Tarifa de energía.

La tarifa de energía de la estación de bombeo del sistema que se desea evaluar.

- Seleccionar bombas.

Las bombas son seleccionadas de acuerdo a la programación que se utiliza regularmente. Matlab carga de la matriz la información de la bomba seleccionada: Potencia, Presión y Caudal.

#### 4.2.3. Eficiencia del sistema.

La eficiencia del sistema se calcula mediante la relación entre la energía hidráulica de salida y la energía eléctrica que entra el sistema de bombas.

**Ecuación 18**

$$Eficiencia = \frac{Energía\ Hidráulica}{Energía\ Eléctrica}$$

*Energía Hidráulica*, energía anual calculada a partir de ecuaciones 16 y 17.

*Energía Eléctrica*, energía anual calculada a partir de vectores de potencia.

La ecuación 19 queda transformada de la siguiente forma:

**Ecuación 19.**

$$eficiencia = 9.8 * 0.7 * (Palta\_m * QZ1\_m * n + Palta\_t * QZ1\_t * m + Palta\_n * QZ1\_n * p) / (Poten\_m * n + Poten\_t * m + Poten\_n * p);$$

Donde,

$m, t, n$ , sufijos asociados a cada variable para mañana, tarde y noche.

$Palta$ , presión de salida estación para cada  $m, t$  y  $n$ .

$QZ1$ , flujo de salida estación para cada  $m, t$  y  $n$ .

$Poten$ , potencia asociada a equipos de bombeo seleccionados.

La eficiencia es un indicador para diagnóstico de la operación y es usado por la superintendencia de servicios públicos para reconocer vía tarifa el costo de energía de los acueductos que tengan eficiencia mínima del 60%.

#### 4.2.4. Variación de volumen.

El programa cuenta con un indicador de la variación del volumen de agua para cada consigna de presión deseada con respecto a los volúmenes históricos suministrado a la red de distribución. De esta manera es posible asociar el control de presiones con las pérdidas por agua no contabilizada por fugas no visibles o conexiones ilegales. El programa calcula la variación de los volúmenes de agua proyectados usando las consignas de presión propuestas con respecto a los volúmenes registrados.

.

#### Ecuación 20

$$\text{Variación} = \text{fix}(3600 * 365 * ((QZ1A\_m * n + QZ1A\_t * m + QZ1A\_n * p) - (QZ1\_m * n + QZ1\_t * m + QZ1\_n * p))) / 1000$$

Donde,

$QZ1A$ , caudales proyectados para mañana tarde y noche ( $m, t, n$ )

$QZ1$ , caudales para presiones históricas registradas.

El resultado entrega la variación de volumen proyectado anualmente.

#### 4.2.5. Mejor combinación de bombas y ahorros de energía.

El programa permite determinar la combinación de bombas más eficiente del sistema de bombeo existente, sin embargo se puede proyectar la incorporación de

un equipo de bombeo y simular que cuenta con velocidad variable. Esto permite calcular futuras inversiones en equipos de bombeo nuevos equipados con variación de velocidad y que operen de forma automática usando las presiones PCC como consigna de control y la velocidad de la bomba como elemento final de control. No es posible cargar el equipo ideal en cada análisis debido a la alta variabilidad de las simulaciones y el número indeterminado de equipos de bombeo que podrían servir dependiendo de cada condición que se proyecte. Por ello se utiliza para la simulación una bomba de eficiencia constante conservadora de 70%. Una vez se cuente con las condiciones de bombeo definitivas, el proyectista podrá ingresar la bomba seleccionada como un vector de la matriz y realizar los cálculos pertinentes.

#### Ecuación 21

$$aee = \text{fix}((\text{Poten}_m * n + \text{Poten}_t * m + \text{Poten}_n * p - (\text{QZ1}_m * \text{Palta}_m * n + \text{QZ1}_t * \text{Palta}_t * m + \text{QZ1}_n * \text{Palta}_n * p) * 9.8 / 0.7) * 365 / 1000);$$

Donde,

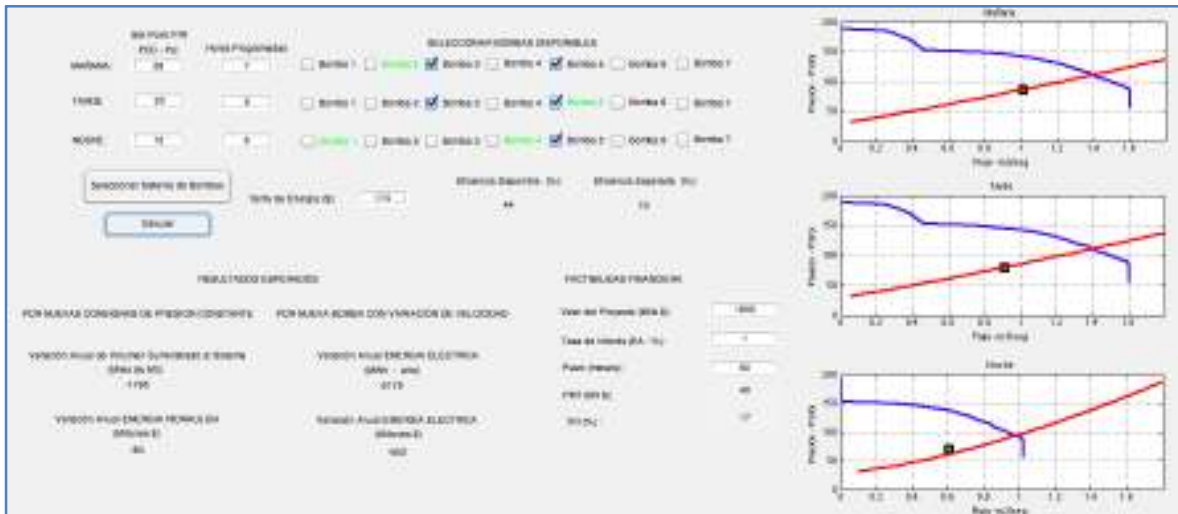
*aee*, Variación de la energía eléctrica.

*Poten*, Potencia eléctrica consumida por bombas existentes.

*QZ1*, caudal de salida de la estación.

*Palta*, Presión de salida de la estación.

*m, p, n*, horas programadas para mañana, tarde y noche respectivamente.



**Ilustración 33. Aplicativo para simular consumo de energía en sistemas de bombeo contra red de distribución. Curvas de bombas, sistema, indicadores de ahorro energía y volumen, eficiencia.**

El programa suministra la siguiente información:

- Variación de volumen suministrado a la red de distribución.

El objetivo de un sistema eficiente es reducir el volumen de agua no contabilizada, por ello las variaciones de volumen deben ser negativas.

- Variación de energía hidráulica.

Corresponde al ahorro de energía sin tener en cuenta la eficiencia de los equipos de bombeo. Con presiones y flujos más reducidos es posible disminuir esta energía. La relación entre la energía hidráulica y la energía eléctrica es el indicador de la eficiencia mecánica de los sistemas de bombeo. La energía hidráulica no tiene en cuenta las pérdidas en bombas, válvulas de la estación.

- Variación de la energía eléctrica.

La variación de la energía eléctrica es un indicador del consumo de recursos energéticos del sistema de bombeo y al multiplicarse por la tarifa da como resultado el costo de energía antes de impuestos. La variación de la energía eléctrica es un índice importante en las políticas de medio ambiente de las empresas.

- Variación del costo de energía eléctrica.

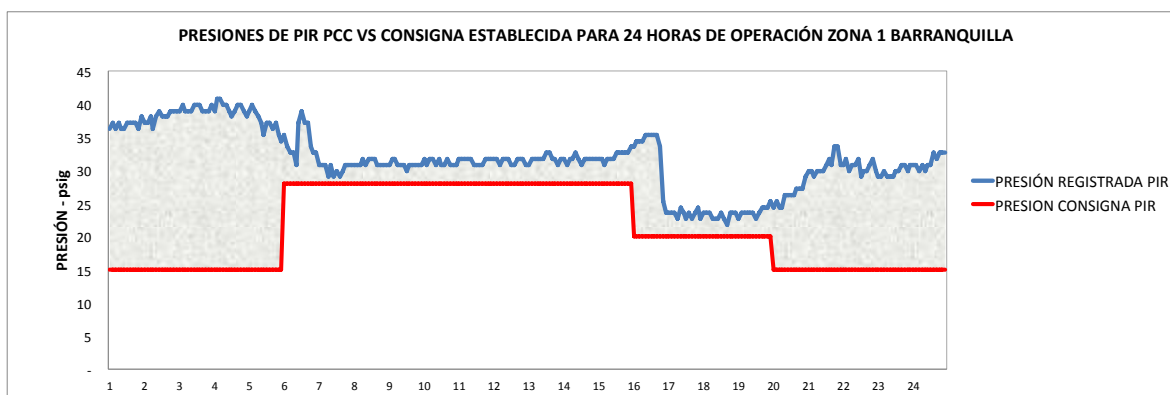
Es un indicador utilizado para cuantificar la viabilidad financiera de un futuro proyecto de ahorro de energía. Es el resultado de multiplicar la variación de la



energía por la tarifa de energía vigente de la estación de bombeo en estudio. Un futuro ahorro en el costo de energía constituye el flujo de caja de proyectos financieros y se utiliza para calcular el retorno de la inversión proyectada.

#### 4.2.6. Caso real de aplicación del modelo para reducir la energía en un sistema de bombeo existente.

La estación de bombeo Alta Presión 1 suministra agua potable a la red de distribución Zona 1 de la ciudad de Barranquilla. La estación de bombeo y la red de distribución se caracterizan por tener la maquinaria y las tuberías con más tiempo de servicio en la ciudad. La operación del sistema utiliza siete bombas centrífugas de diferentes capacidades y programadas de tal forma que cubran la demanda del servicio de acueducto. La principal variable de la operación es la presión de la red en un punto remoto de la misma denominado PIR (Punto de Inspección Remota), el valor de la presión del PIR es la consigna del centro de control y se tiene establecido 28 PSIG en la mañana, 20 PSIG en la tarde y 15 PSIG en la noche.



**Ilustración 34. Registro de presiones registradas en la red de distribución Zona 1 en un día típico vs Presiones de consigna establecidas.**

En la ilustración 35 se puede observar para un día típico que las presiones registradas en la red sobrepasan las presiones de consigna establecidas, especialmente en las horas de la noche.

Las unidades de bombeo utilizadas son:

**Tabla 15. Programación de bombas para la Zona de Presión 1.**

Horario	Consigna en PIR	Bombas Programadas
5:00 AM – 4 PM	28 psig	# 3 , # 5
4:00 PM – 8 PM	20 psig	# 5
8:00 PM – 5 AM	15 psig	# 3

Objetivos del caso:

- Determinar los costos de operación actuales y la eficiencia.
- Determinar la combinación más eficiente entre las 7 disponibles.
- Determinar la variación del volumen suministrado de cumplirse las consignas.
- Determinar los ahorros de energía si se instalara una bomba de velocidad variable adecuada para el sistema.

En la ilustración 36 se observan el cuadro de diálogo de la herramienta computacional. Se ingresan las consignas establecidas y la programación de equipos contenidos en la tabla 15. Adicionalmente se ingresa el valor de la tarifa de energía.

Usando los modelos de regresión para la Zona de Presión 1 se pueden calcular las variables de operación de salida de la estación de bombeo para cada horario tal como se observa en la tabla 16. Los resultados de estas variables se visualizan como un punto color verde en los gráficos del aplicativo como se observa en la ilustración 36.

**Tabla 16. Tabla de resultados de las variables de operación requeridas en la estación de bombeo para unas consignas de presión de red establecidas.**

	CONSIGNA (psig)	Presión Estación (psig)	Caudal Estación (m3/segundo)	Potencia Requerida (kW - hidráulico)
MAÑANA	28	86	1.01	594
TARDE	20	76	0.85	441
NOCHE	15	69	0.61	288

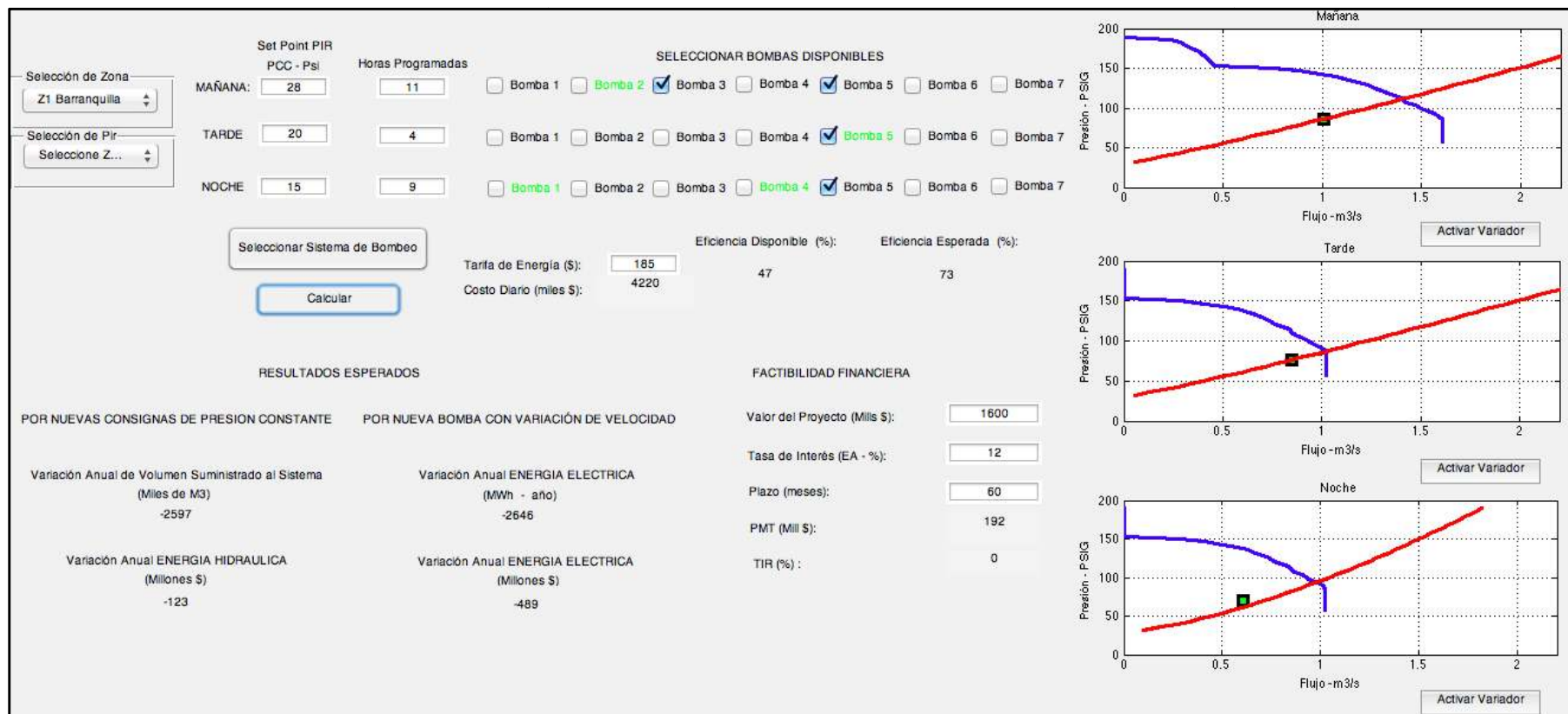


Ilustración 35. Visualización del aplicativo computacional para diagnóstico y proyección de ahorros hidráulicos y energéticos en sistemas de bombeo.

La herramienta computacional entrega resultados visuales, numéricos y gráficos para la toma de decisiones de la operación del sistema. Los más importantes son:

- Costos Diario de Operación: \$4'220.000.

Corresponde a los costos de energía diarios que consumen los equipos de bombeo programados.

- Eficiencia Disponible: 47%.

Es la relación entre la energía hidráulica de salida con respecto a la energía eléctrica que consumen los equipos.

- Combinación de bombas más eficiente: Mañana #2, Tarde #5, Noche #3 y #4.

El aplicativo tiene un algoritmo que simula todas las permutaciones posibles que satisfagan las consignas y selecciona la que registre la mínima potencia. Los resultados se visualizan cuando el texto del(los) equipo(s) pasa(n) a color verde.

- Variación de volumen suministrado al sistema por año: - 2'597.000 m<sup>3</sup> / año.

El aplicativo proyecta anualmente el volumen suministrado al sistema a partir del caudal de salida de la estación. Este dato lo compara con el volumen que se suministra actualmente y que está almacenado en el SCADA. El resultado fue negativo debido a que se están proyectando presiones más bajas a las registradas diariamente.

- Variación anual de energía eléctrica con bombeo a velocidad variable: \$489 millones / año.

Es el resultado de la diferencia entre la energía anual que consumen los equipos seleccionados con la energía anual que consumiría un equipo de alta eficiencia que entregase la energía hidráulica requerida. Este valor es de gran utilidad para estudios de factibilidad de futuras inversiones con retornos por ahorro de energía.

Al seleccionar las bombas recomendadas por la herramienta la variación anual de la energía pasa a ser \$137 millones. Esto representa un ahorro significativo en los costos de operación del sistema.

## **5. Conclusiones y recomendaciones.**

El software que utilizan los centros de control de procesos industriales tiene la capacidad de proveer toda la información que se genera en el proceso productivo de potabilización y distribución del agua potable por medio de estaciones de bombeo y puntos críticos de medición de presiones en la red de tuberías. Los datos almacenados de las principales variables de operación pudieron ser utilizados para determinar los modelos de regresión que permitieron modelar los sistemas de bombeo de acuerdo a los patrones de consumo de la población atendida. A continuación se presentan las principales conclusiones derivadas del desarrollo de un modelo para simular los consumos de energía basado en el control de presiones de la red de distribución así como recomendaciones que podrían desarrollarse en trabajos futuros.

### **Conclusiones**

El desarrollo de un modelo basado en el diseño y análisis de modelos de regresión para simular los comportamientos de las redes de distribución de agua potable difiere de los métodos utilizados tradicionalmente. Los métodos tradicionales deben compensar las incertidumbres derivadas del desconocimiento detallado de la red, las fugas no visibles y el estado real de la tubería. Estos métodos pierden precisión a medida que la red va envejeciendo y adicionalmente deben calibrar factores relacionados con los patrones de consumo de la población atendida.

El método propuesto es más cercano a la realidad pues aplica la estadística a los datos reales almacenados, los clasifica, detecta datos no válidos y permite la creación de varios modelos para cada patrón de consumo de agua de la población. Para ello adapta las variables de la operación para determinar la energía del sistema de bombeo y determinar la eficiencia de los equipos existentes.

Los análisis de varianza fueron utilizados para clasificar las zonas de operación, sin embargo fue necesario complementarlo con los análisis de bloques para

delimitar dichas zonas y desechar los estados de transición. Las zonas de transición son generadas de dos maneras: cada vez que el operario altera la posición de una válvula o bomba del sistema ocasionando golpes de ariete o desfase de los datos debido al retraso en instrumentos y sistemas de comunicación. También se generan zonas de transición durante los cambios en la demanda, por ejemplo en horas de la madrugada (5 am) ocurre un fenómeno de despresurización de la red y en horas de la noche (7 pm) ocurre un fenómeno contrario cuando se reduce la demanda. Durante el estudio se encontraron datos de flujo que tardaban 60 minutos en estabilizarse, por ello fue necesario suprimir ese tipo de datos para lograr residuales aceptables. Luego de suprimir los estados transitorios el valor absoluto de la media de los errores del experimento pasaron de 12% a 9.5%.

Se utilizaron herramientas computacionales para hacer análisis de regresión que permitieron determinar la potencia hidráulica en función de una presión deseada de un punto crítico de la red. La estructura del modelo fue forzada para responder a principios físicos antes de hacer los desarrollos matemáticos. Con las regresiones validadas se procedió a desarrollar el modelo mediante el cual el investigador ingresa los valores deseados de los puntos críticos del sistema, la duración de cada consigna, la tarifa de energía y la selección de la matriz de datos técnicos de los equipos que usa dicho sistema. El modelo entrega datos de salida como el indicador de eficiencia del sistema de bombas y válvulas, la anualidad de la variación del volumen de agua bombeado con respecto a los históricos de años anteriores, la cantidad de energía y su valor que es factible de reducir en caso que se reemplacen los equipos existentes. Adicionalmente el programa también visualiza los gráficos de comportamiento hidráulico del sistema, de la(s) bomba(s) seleccionada(s) y el punto de operación deseado de la estación de bombeo. Cada período del día cuenta con su respectivo gráfico que permite al investigador interpretar fácilmente los resultados.

El aplicativo desarrollado permite comparar las eficiencias entre los equipos de bombeo disponibles abriendo la posibilidad de ahorros inmediatos sin necesidad de realizar inversiones significativas. Adicionalmente permite detectar equipos que

no cumplan con la capacidad de diseño original de fábrica, esto se evidencia cuando el equipo que cumple en el modelo tiene deficiencias de flujo y presión en la situación real. Para estos casos el investigador y el administrador del sistema deben investigar posibles problemas de instalación, desgaste de rotor/estator, válvulas estranguladas, recirculación, etc...

### **Recomendaciones**

Investigar la posibilidad de crear zonas de operación adicionales a las detectadas por medio del análisis de bloques. Entre más zonas de operación existan los modelos de regresión serán más precisos lo que permitirá tener menos incertidumbre en caso de futuras tomas de decisiones. Es posible que en el transcurso de las zonas de operación de un día normal los patrones de comportamiento de la comunidad tengan variaciones que aunque sean pequeñas puedan ser significativas y permitan minimizar los errores del modelo. Adicionalmente es necesario incluir los pronósticos climatológicos y definir un modelo para un número determinado de días lluviosos durante el año de estudio.

Incluir en el aplicativo un algoritmo que determine cuál es la combinación de bombas más eficiente para un punto de operación deseado. Actualmente se puede detectar ensayando todas las permutaciones posibles descontando las restricciones por dependencia eléctrica, dependencia hidráulica u operaciones por fuera de los límites. El desarrollo de este algoritmo ayudará en estaciones de bombeo desconocidas para el investigador o administrar del sistema.

Desarrollar un módulo financiero. En la misma pantalla del aplicativo se puede incluir un tag de entrada donde el investigador coloque la inversión requerida para el reemplazo de los equipos de bombeo existente, el plazo de financiación del proyecto y la tasa de interés. El aplicativo entregará los indicadores financieros que servirán para determinar si financieramente es viable el proyecto.



Diseñar un sistema de control. En los casos en que los proyectos de inversión de nuevos equipos resulten viables y se decida automatizar se hace necesario el diseño de la estrategia de control más adecuada para optimizar el consumo de energía. Esto aplica para sistemas que ya cuenten con equipos automatizados. El éxito de la estrategia de control hará más robusta la inversión realizada y permitirá una rentabilidad del proyecto más confiable.

- [1] S. Ghimire, "Relationship between Pump Horsepower and Energy Usage in Municipal Water Networks," in *World Environmental and Water Resources Congress 2010*, 0 vols., American Society of Civil Engineers, 2010, pp. 4180–4184.
- [2] G. Grigoras, M. Istrate, and F. Scarlatache, "Electrical energy consumption estimation in water distribution systems using a clustering based method," 2013, pp. 1–6.
- [3] S. R. Ghimire and B. D. Barkdoll, "Issues in Energy Consumption by Municipal Drinking Water Distribution Systems," 2007, pp. 471–471.
- [4] R. Wilkinson, "Integrating Water and Energy Resource Management: Progress and Opportunities," in *World Environmental and Water Resources Congress 2007*, 2 vols., American Society of Civil Engineers, 2007, pp. 1–17.
- [5] O. US EPA, "Energy Efficiency for Water and Wastewater Utilities." [Online]. Available: <http://water.epa.gov/infrastructure/sustain/energyefficiency.cfm>. [Accessed: 07-Jul-2012].
- [6] J. Lee and A. Fayyaz, "Experimental Study of the Drinking Water Service Lines with Leaks," 2010, pp. 14–14.
- [7] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA, "Pérdidas de agua en Colombua." 2010.
- [8] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Republica de Colombia, "Resolución CRA N°688 de 2014 para edición y copia." 24-Jun-2014.
- [9] Sociedad de Acueducto Alcantarillado y Aseo de Barranquilla - Triple A, "Redes de tubería de agua potable." Jul-2014.
- [10] O. Giustolisi, D. Savic, and Z. Kapelan, "Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 134, no. 5, pp. 626–635, May 2008.
- [11] J. Saldarriaga, F. Contreras, and A. Sisa, "Methodology for the Determination of Optimal Water Head Pressure in Water Distribution Network," in *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 4 vols., American Society of Civil Engineers, 2003, pp. 1–10.
- [12] H. Awad, Z. Kapelan, and D. Savi?, "Analysis of Pressure Management

Economics in Water Distribution Systems,” in *Water Distribution Systems Analysis 2008*, 0 vols., American Society of Civil Engineers, 2009, pp. 1–12.

[13] J. Almandoz, E. Cabrera, F. Arregui, E. Cabrera, and R. Cobacho, “Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 131, no. 6, pp. 458–466, Nov. 2005.

[14] T. Augustyn, “Energy efficiency and savings in pumping systems &#x2014; The holistic approach,” 2012, pp. 1–7.

[15] A. Ostfeld, E. Salomons, L. Ormsbee, J. G. Uber, C. M. Bros, P. Kalungi, R. Burd, B. Zazula-Coetzee, T. Belrain, D. Kang, K. Lansey, H. Shen, E. McBean, Z. Yi Wu, T. Walski, S. Alvisi, M. Franchini, J. P. Johnson, S. R. Ghimire, B. D. Barkdoll, T. Koppel, A. Vassiljev, J. H. Kim, G. Chung, D. G. Yoo, K. Diao, Y. Zhou, J. Li, Z. Liu, K. Chang, J. Gao, S. Qu, Y. Yuan, T. D. Prasad, D. Laucelli, L. S. Vamvakieridou Lyroudia, Z. Kapelan, D. Savic, L. Berardi, G. Barbaro, O. Giustolisi, M. Asadzadeh, B. A. Tolson, and R. McKillop, “Battle of the Water Calibration Networks,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 138, no. 5, pp. 523–532, Sep. 2012.

[16] H. Zhang and T. Huang, “Optimal Distribution of Pressure Measurement Points in Water Distribution Networks,” in *World Environmental and Water Resources Congress 2009*, 2 vols., American Society of Civil Engineers, 2009, pp. 1–7.